

テクニカルセミナー/第123回空間情報話題交換会
2024年2月9日(金) 17:30-19:30

空間情報技術の活用： 事前通行規制制度と アンダーパスの地震時被害を題材に

京都大学大学院 工学研究科 助教

宮崎 祐輔

KYOTO UNIVERSITY

京都大学



自己紹介

– Development and Operation Model of Plant-derived Soil Additives for Road Disaster Reduction on Problematic Soil –

略歴

- 2019年3月 京都大学大学院工学研究科 工学博士
- 2019年4月～現在
京都大学工学研究科 助教 着任
- 信条：大人虎変 君子豹変 小人革面
 - 『周易』第四十九卦
- 趣味：情報収集・料理・旅行 (30-3)



サハラ砂漠



ケニア・道直し



リーズ大学留学



シルクロード陸路横断



台湾大学写真展



セブ島道直し

本日の話題

- 最近面白いと思った技術
- アンダーパスの地震時被害
- 異常気象時における事前通行規制とは？

最近面白いと思った技術



Mobile ALOHA

Mobile ALOHA - A Smart Home Robot - Compilation of Autonomous Skills
<https://www.youtube.com/watch?v=zMNumQ45pJ8>

【ショートコラム】アメリカCESにイーロン・マスクが作った“謎の地下トンネル”？（NHK）

https://www3.nhk.or.jp/news/special/international_news_navi/articles/cor/2023/01/17/28647.html



「ベガスループ」に乗ってみる（クリックすると動画が再生されます）

テスラ

\$187.58 ↑ 14,554.69% +186.30 最大

時間外取引: **\$187.65** (↑0.037%) +0.070

終了: 2月7日, 19:59:59 UTC-5 · USD · NASDAQ · 免責条項

1日 5日 1か月 6か月 年初来 1年 5年 最大 × 重要なイベント



<https://www.google.com/finance/quote/TSLA:NASDAQ?sa=X&sqi=2&ved=2ahUKewjgg96fqJuEAXV6avUHHcajBWEQ3ecFegQleBAX&window=MAX>

電気自動車中心の社会が到来した時，土木分野に期待される技術は？



実証実験で使用する車両と路面構造



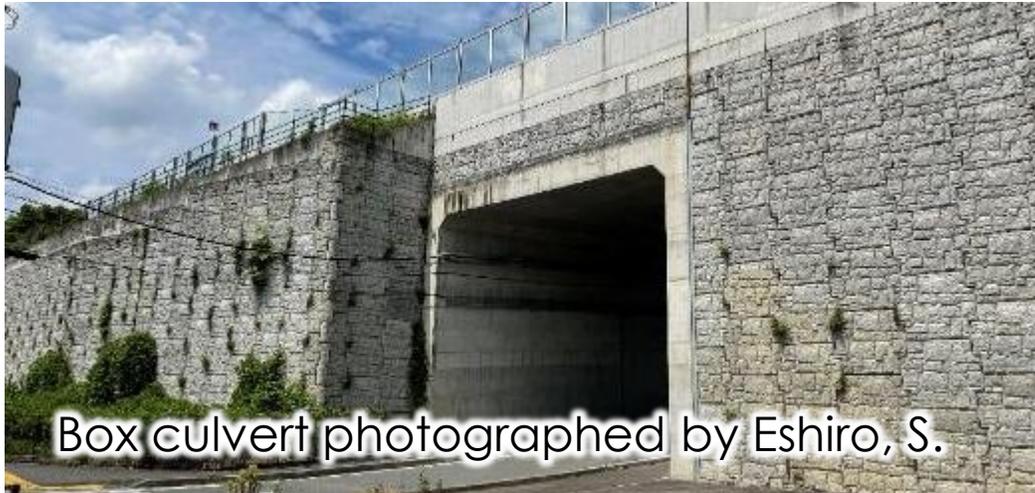
アンダーパスの地震時被害

以降に示す本講演会の資料は、主に以下の成果により構成される。

Miyazaki, Y. et al. (2025). Traffic Disruptions in Box-Type Embankment-Underpasses Due to Past Earthquakes in Japan. In: Rujikiatkamjorn, C., Xue, J., Indraratna, B. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG) 2024, Volume 2. ICTG 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 403. Springer, Singapore.

https://doi.org/10.1007/978-981-97-8217-8_6 ここに記して、共同研究者に謝意を示す。

1995年兵庫県南部地震後、地中ボックスカルバートの耐震性に関する研究が活発化



- 兵庫県南部地震以降、構造物の耐震性に関心が高まる
 - 一方で、**盛土・地中全体系の議論が不足**



大開駅、中柱の崩壊
(Special Issue of Soils and Foundations, 1996)

Sharma S, Judd WR (1991) Underground opening damage from earthquakes. Eng Geol 30:263–276 Special Issue of Soils and Foundations (1996) Selected photographs on the 1995 Hyogoken - Nambu earthquake. Special issue on geotechnical aspects of the 17 January 1995

未解明なボックスカルバートの地震時モードを体系化する

構造としての耐震性が向上する一方で供用性を損なう事例が頻発

Ohtsuka, 2004



The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004

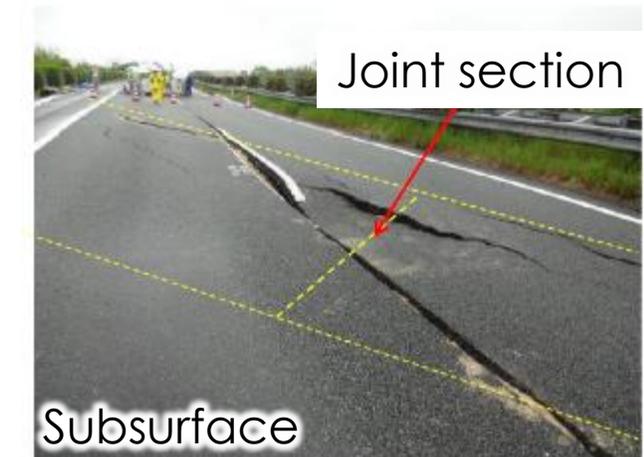
Ito et al., 2020



The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake



The 2016 Kumamoto Earthquake



- 高速道路の土工（道路土工構造物技術指針）
 - 通行機能維持が求められる：どうすべきか？

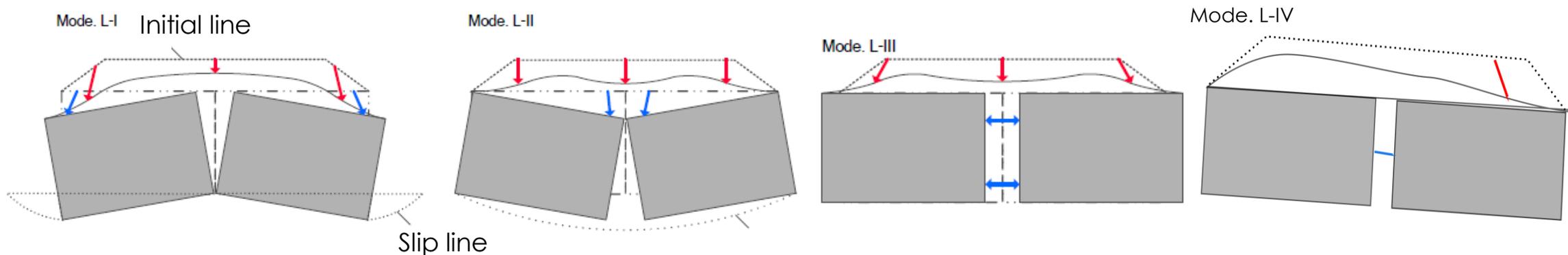
Ohtsuka S., Characteristics and issue of The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004, http://library.jsce.or.jp/Image_DB/eq04-07/proc/02002/2006-0041.pdf (in Japanese)

Ito et al., Study on behavior of culvert due to liquefaction during earthquake, 2021 Volume 67A Pages 161-173, <https://doi.org/10.11532/structcivil.67A.161> (in Japanese)

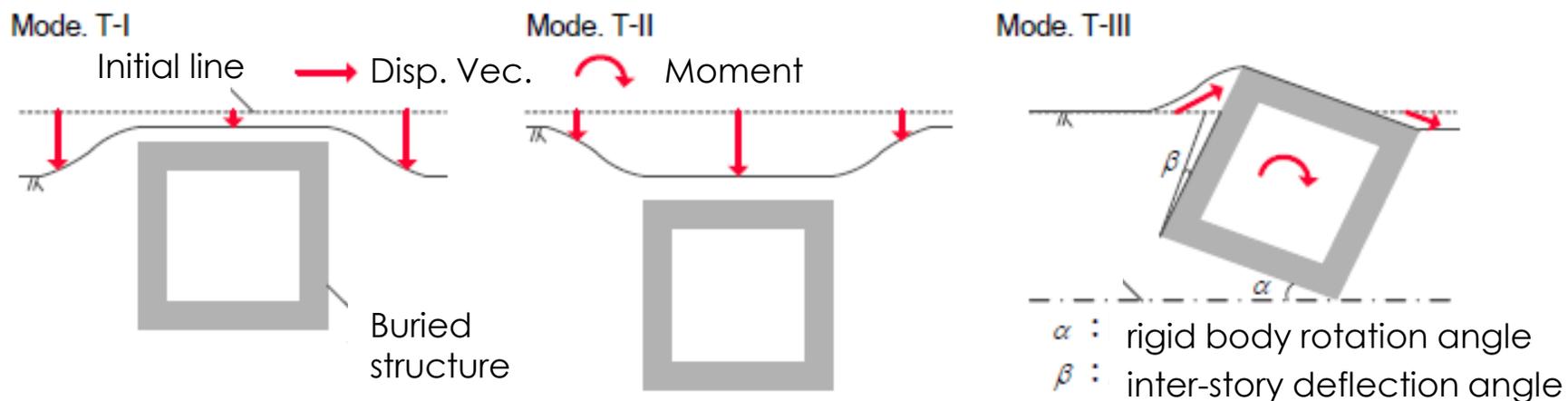
未解明なボックスカルバートの地震時モードを体系化する

躯体の損傷を除いた場合に，供用性を損なうボックスカルバートの変位モードを仮定

Structure-longitudinal direction



Structure-transverse direction (Mode T-III. Is modified after Yamaki et al, 2014)

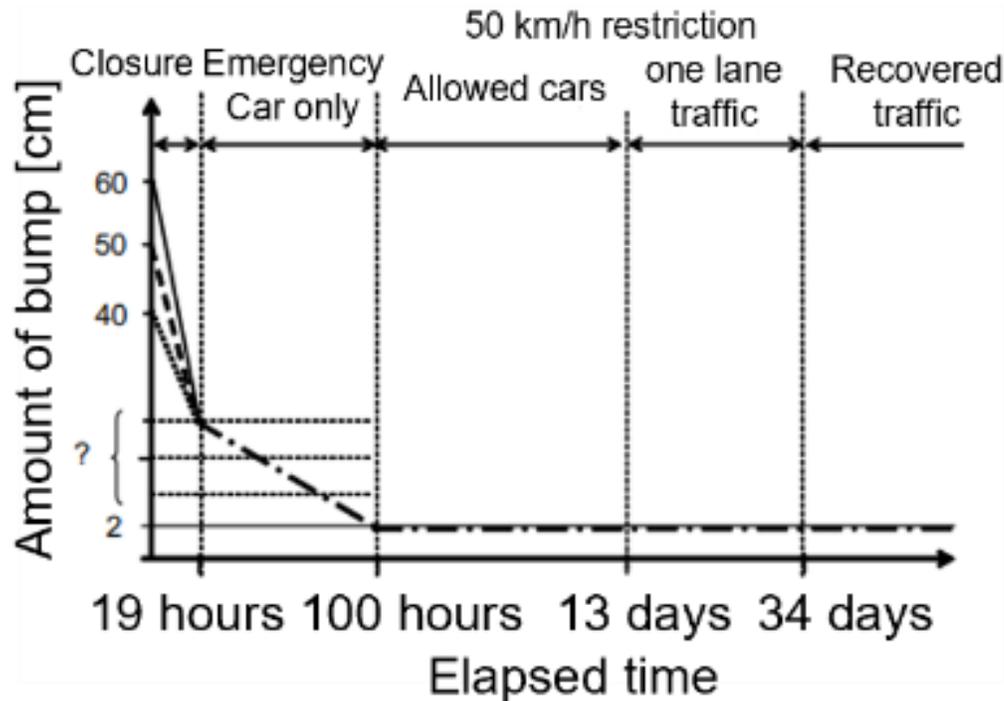


Yamaki, M. et al:

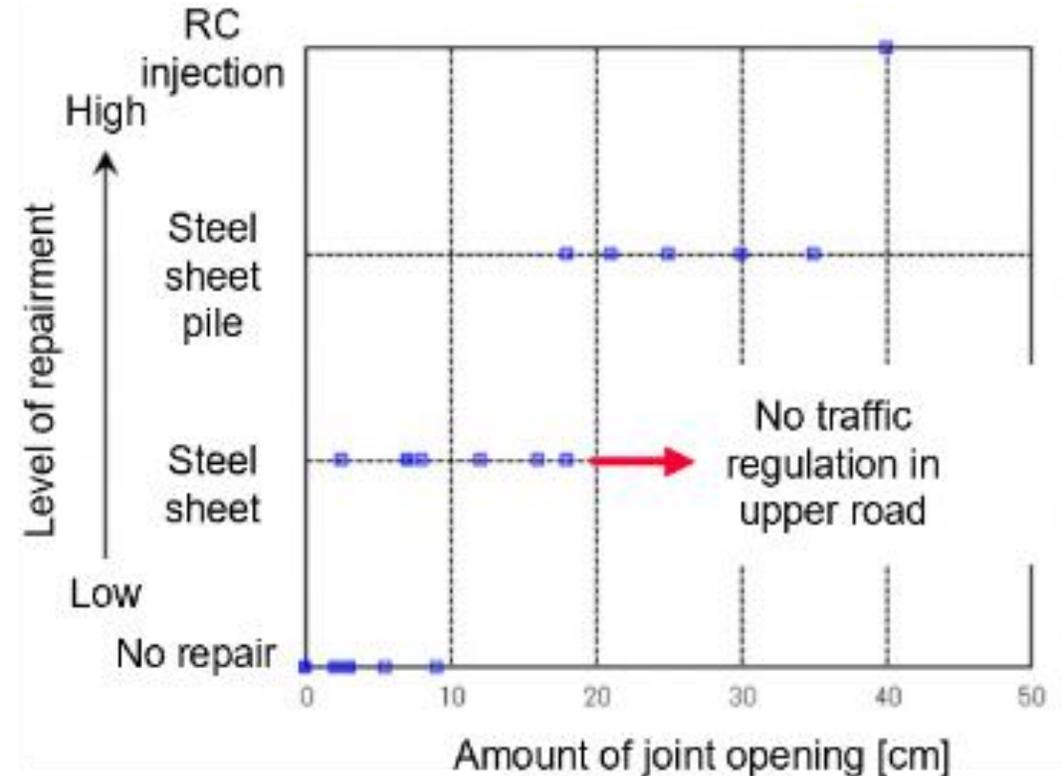
Dynamic centrifuge model tests on dynamic behavior of box culvert in large earthquake, Proceedings of 56th Symposium of Geotechnical Engineering, pp.37-44. (in Japanese)

段差量・目開き量と交通性・補修性

N mmまでに被害を抑えたいか？



段差量と通行性 (Tokida et al., 2007)



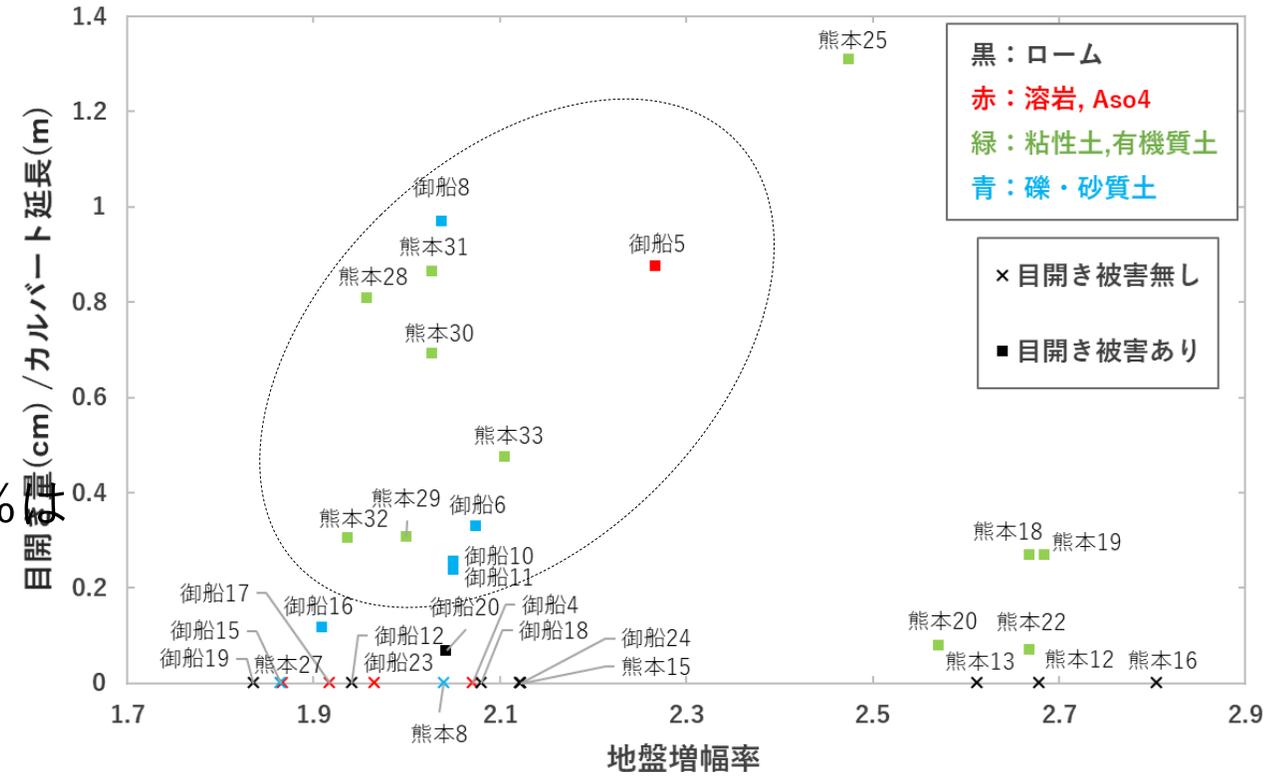
目開き量と補修性 (Nanazawa et al., 2022)

Tokida, K., Oda, K., Nakahara, A., Hayashi, K., Yorifuji, M.: Performance-based road management against bump damage induced by earthquake based on driving test, Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium, 2007, 29, 596-604, (2007) (in Japanese). <https://doi.org/10.11532/proee2005a.29.596>

Nanazawa, T., Ito, H., Tani, T., Sasaki, A., and Sasaki, M.: Study on behavior of culvert due to liquefaction during earthquake, Technical Note of National Institute for Land and infra-structure Management, National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan 1219 (2022) (in Japanese). <https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1219pdf/ks1219.pdf> last accessed 2023/11/26.

目開き量を地盤増幅率で整理

- ✓ 熊本 18, 19, 20, 22, 25 ← 軟弱地盤対策工
→ 目開きが抑制
- ✓ 目開きが発生したカルバートの89%は
粘性土・有機質土か礫質土・砂質土
目開きが発生しなかったカルバートの79%は
ロームか溶岩・Aso4
- ✓ 熊本18, 19, 20, 22を除くと、
被害が発生したカルバートの
地盤増幅率と目開き量に相関関係がある
(相関係数：0.64, p値：0.0067)

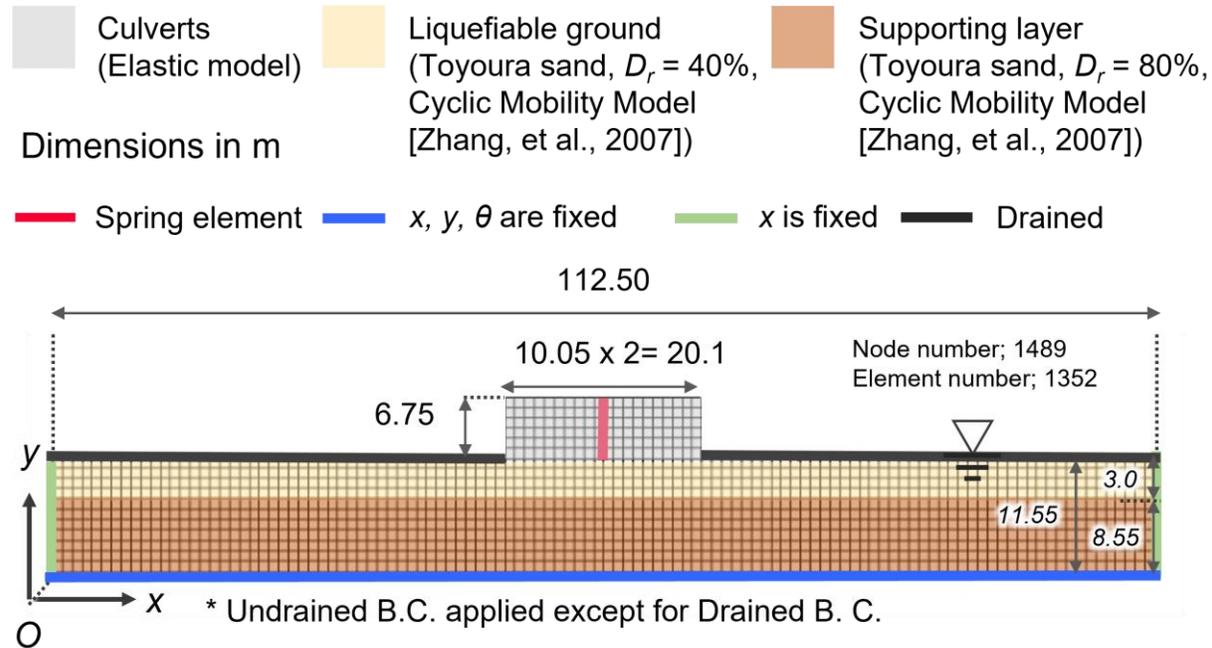


地盤増幅率と目開き量の関係

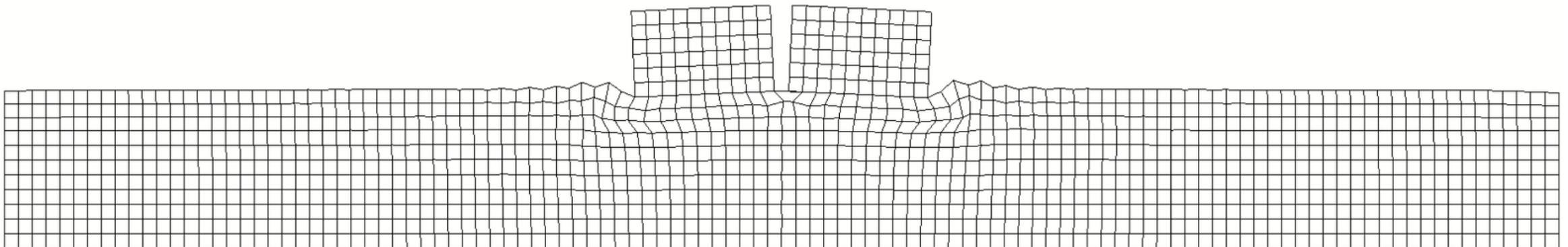
基礎地盤の土質区分が目開き発生の有無に関係

地盤増幅率が目開き量の大きさに関係

液状化地盤上におけるボックスカルバートの目開き現象 (Level 1 type-III)



回転剛性0, y 方向摩擦 1mm 考慮



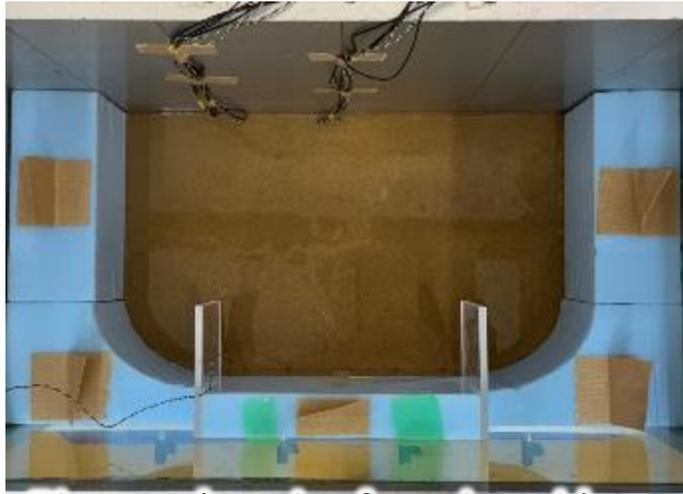
作製手順

気中落下法により基礎地盤を作製し，粘性を50倍としたメトローズにより飽和

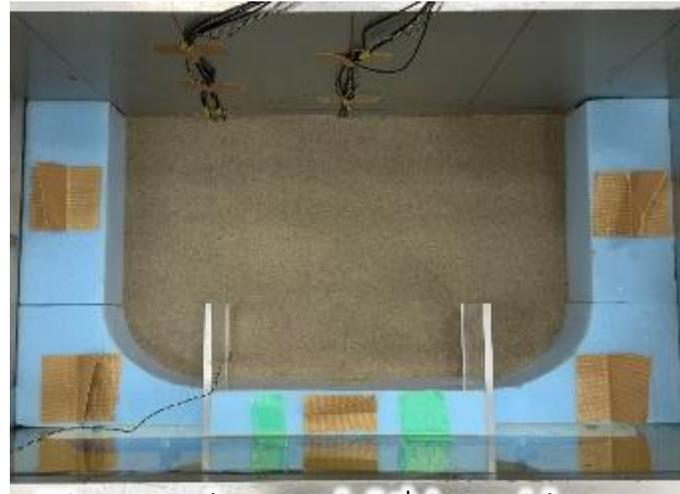


作製手順

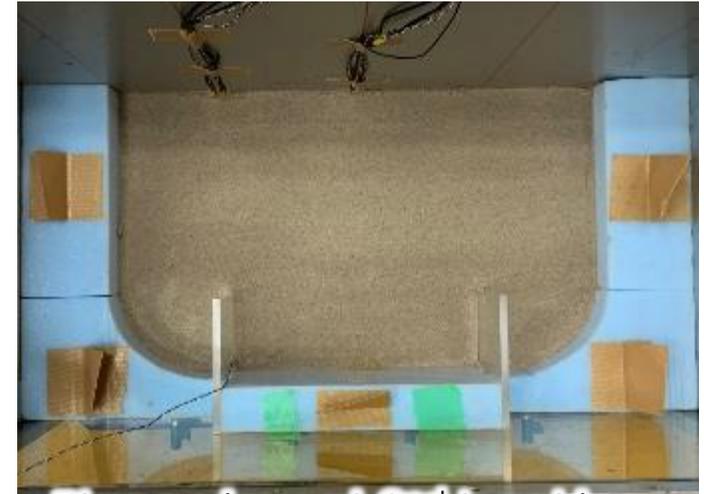
含水比を調整した7号珪砂により盛土部を突き固めにより作製



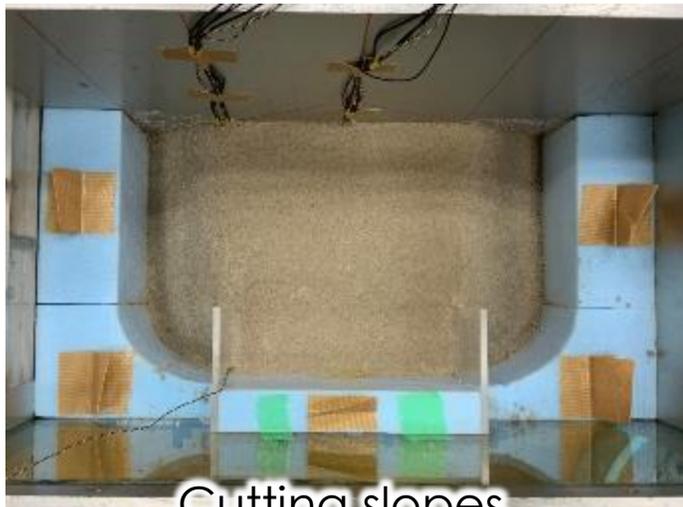
Plane view before banking



Plane view at 1st banking



Plane view at 2nd banking



Cutting slopes



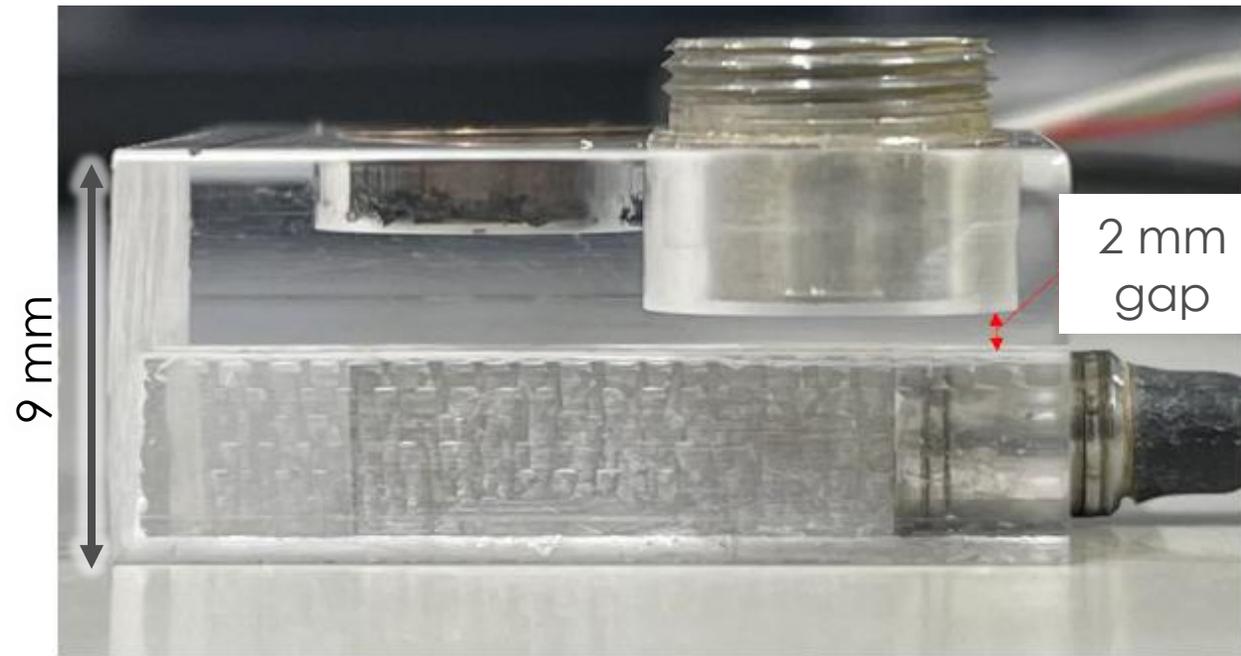
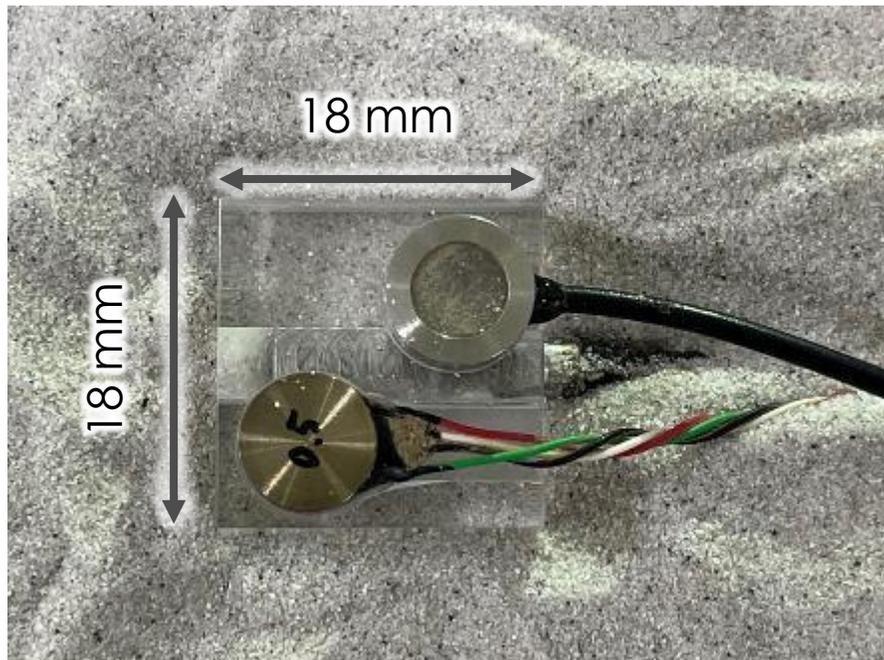
Releasing temporal blocks



Completion of model making

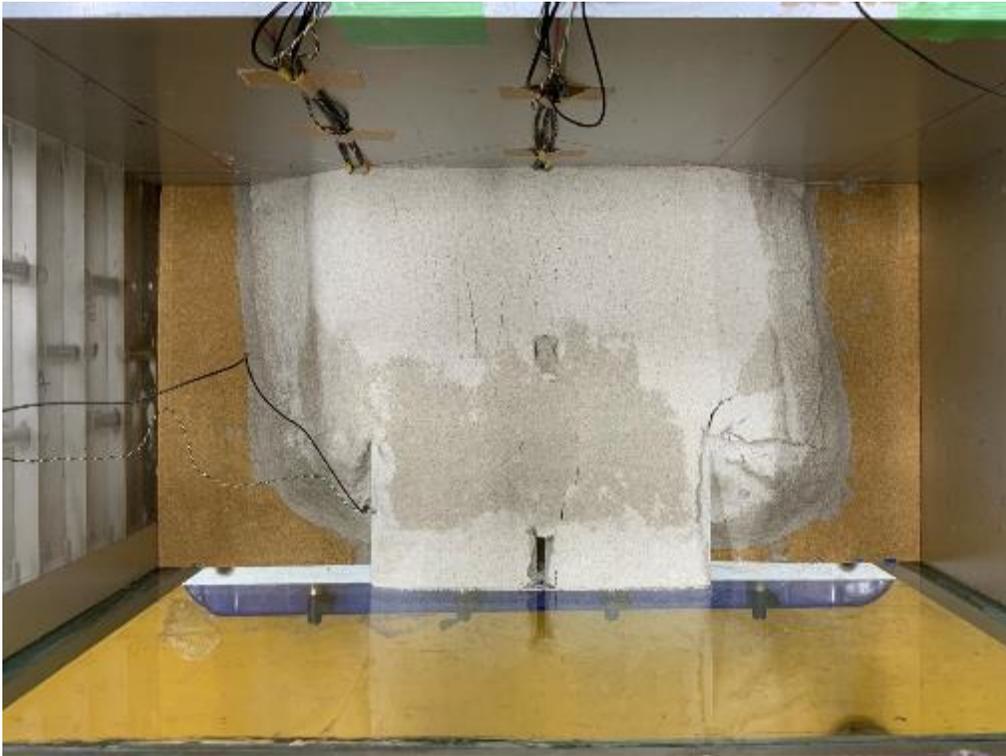
センサの構造

全応力，間隙水圧，水平加速度を1点で計測する



- PDA-200KPB (Tokyo Measuring Instrument Lab.) for vertical pressure
- P306A SSK (Co., Ltd.) for pore water pressure gage
- BW21SG2 (Fuji Ceramics Corporation) for accelerometer

カルバートが両坑口に向かって倒れこむモードを示す (Mode L-I)



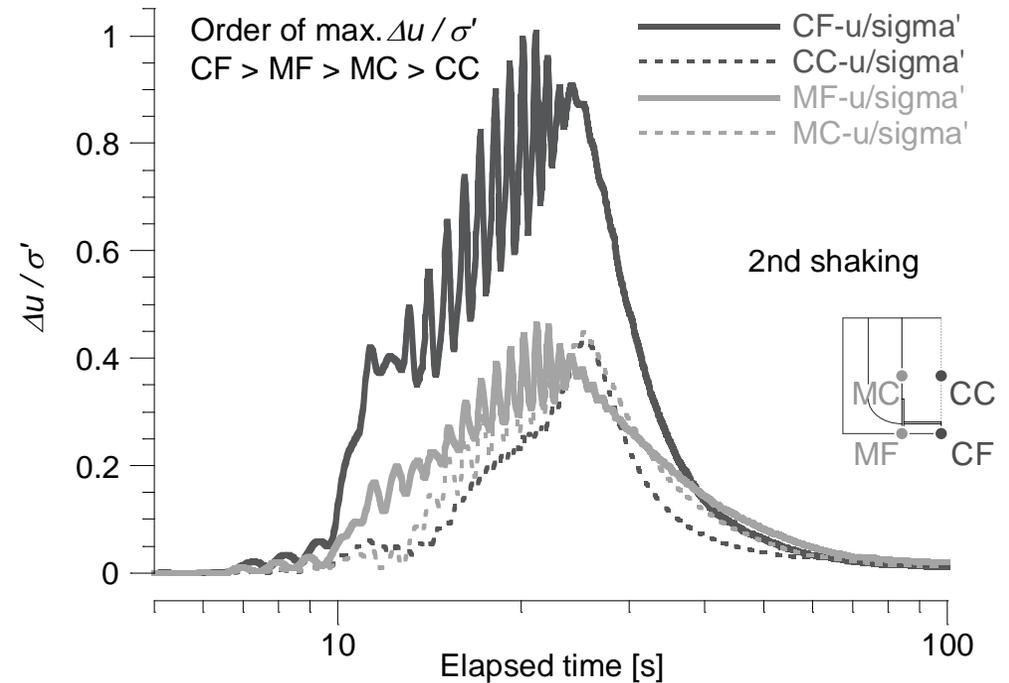
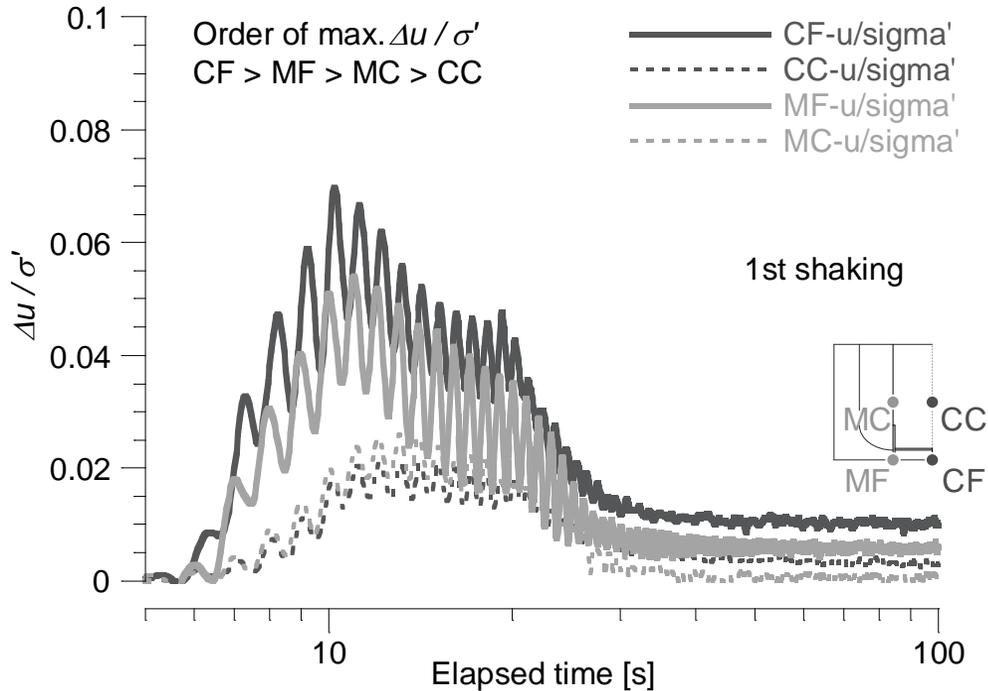
Plane view of underpass model



Front view of underpass model

- 継ぎ目の下部に噴砂を確認

過剰間隙水圧比の増大速度，最大値に明確な順序が現われる



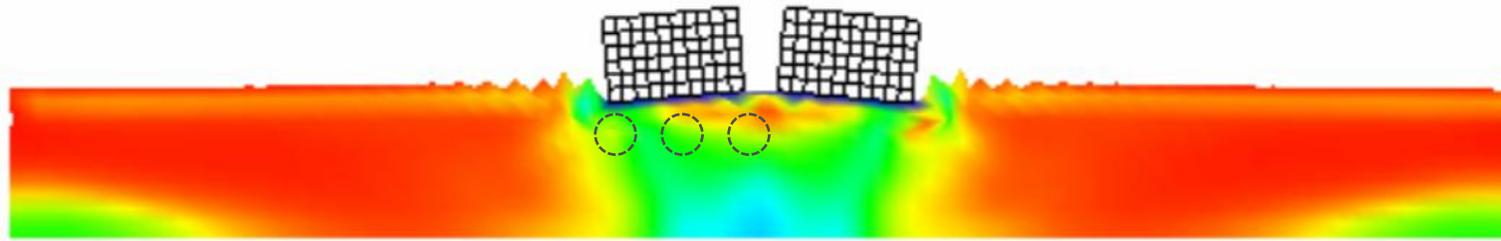
- 何がこの違いをもたらしたか？

- 排水条件，上載圧の影響（有効拘束圧の違い）

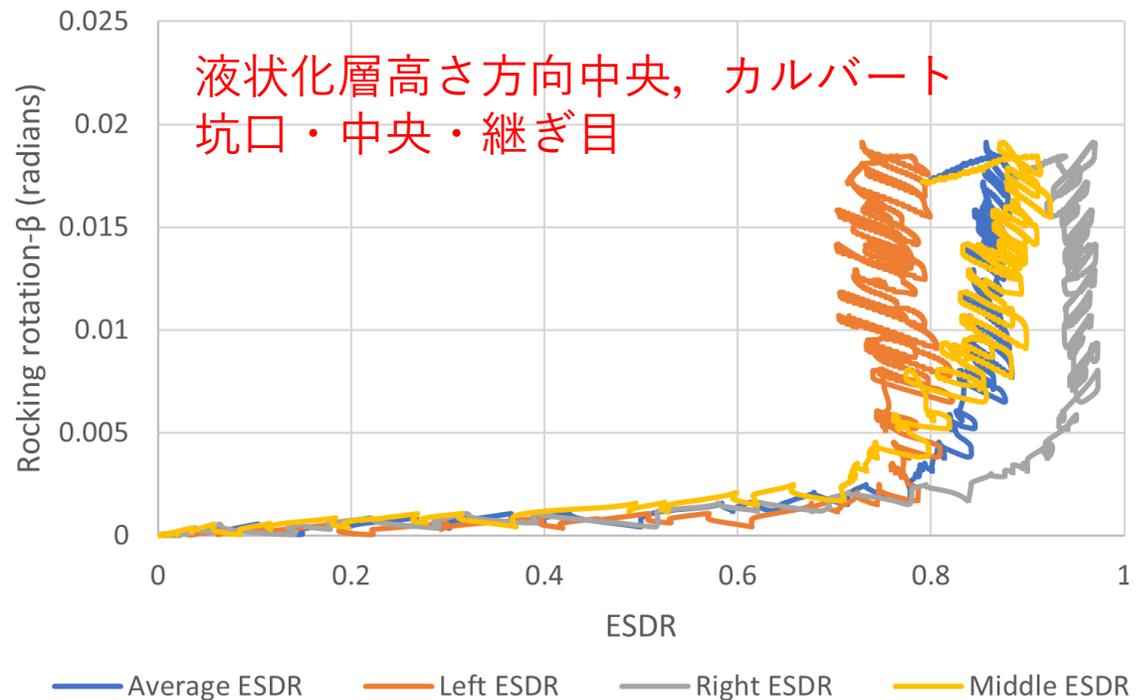
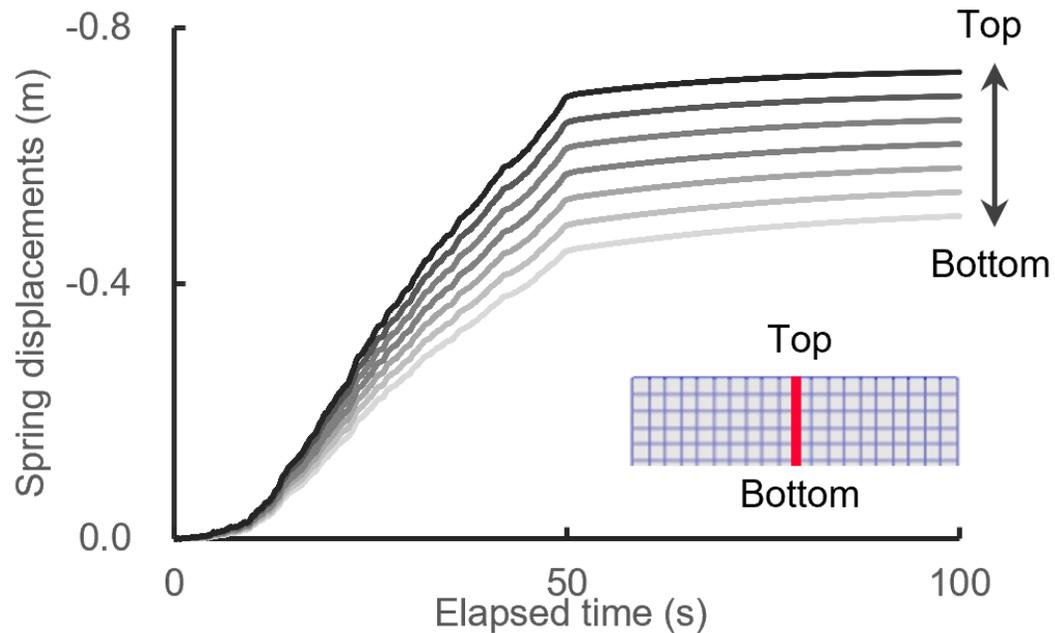
- 先行研究：カルバート（伊藤ら，2021），盛土（谷口ら，1985）

- カルバートがこれに寄与したか否かの立場により対策が異なる

土の拘束圧と構造物の残留変位の関係



$$ESDR = 1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}}$$



空間情報技術の使いどころ

復旧後の状態から，変状モードを推定可能か？可能であれば，妥当性が示される



粘土地盤上における目開き実験の試行段階

熊本25（坑口部の舗装にひび割れ，
連結数4，中央部で目開き，軟弱地盤対策工）

- 現場計測 × 模型実験 × 数値解析 → 供用性の喪失リスク評価，対策工の提案

異常気象時における事前通行規制

以降に示す本講演会の資料は、

新都市社会技術融合創造研究会 岸田 潔 代表の 「土壌水分を考慮した斜面監視システムの実装」

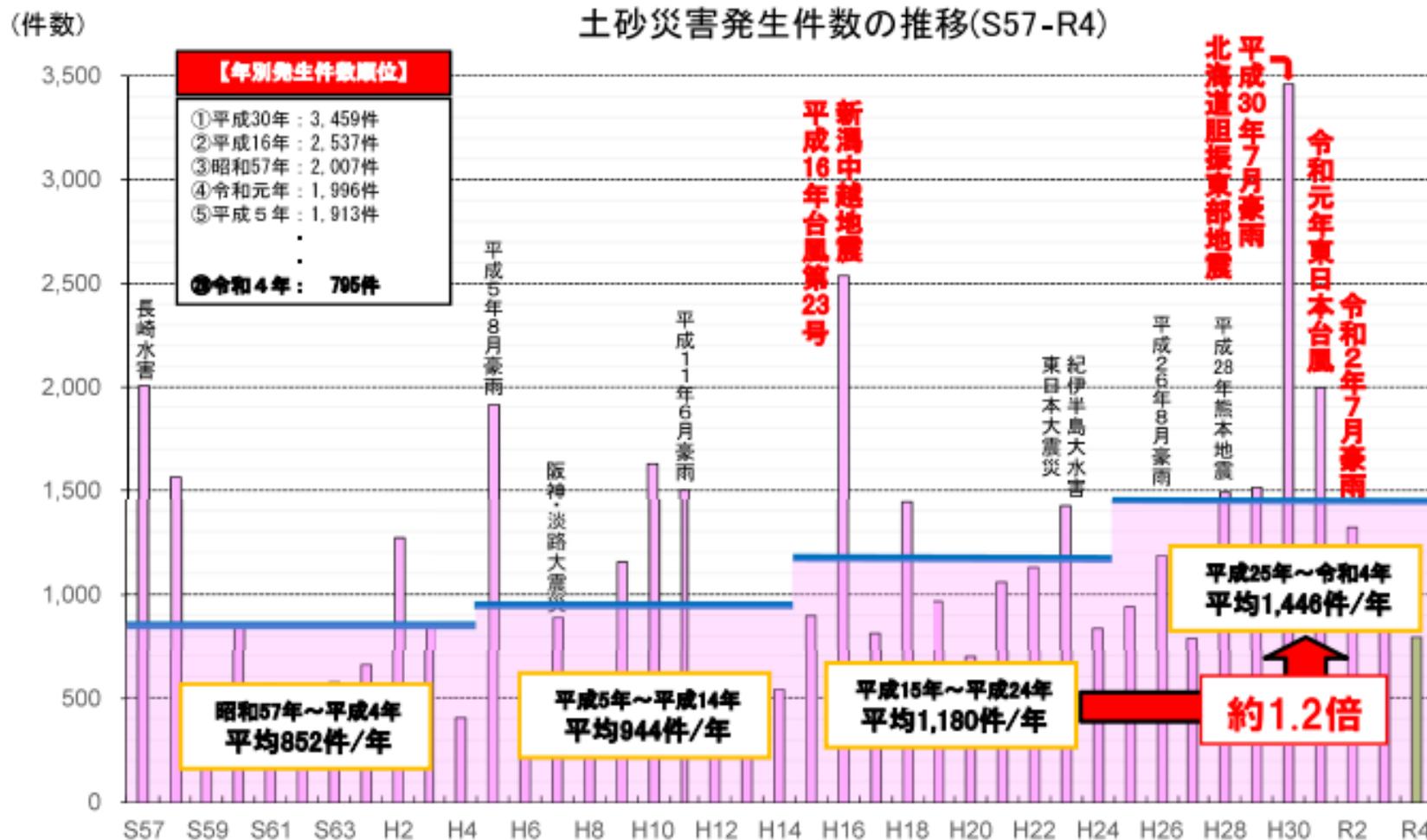
PJメンバーにより得られた研究成果である。講演者は幹事を務めた。ここに記して謝意を示す。

目次

- 異常気象時における事前通行規制とは？
 - ✓ 災害リスクの回避と監視コストをバランスさせる時間的・空間的な適正化の必要性
- 時間的・空間的な適正化に向けた土壌水分量指標に基づく新基準の提案
 - ✓ スネーク曲線（土壌雨量指数と時間雨量の履歴曲線）と警戒基準による通行規制及び解除

土砂災害発生件数の推移(S57~R4)

■令和4年1月から12月の1年間に発生した土砂災害は**795件**であった。土砂災害は42道府県で発生した。



事前通行規制の変遷

事前通行規制制度の歴史*

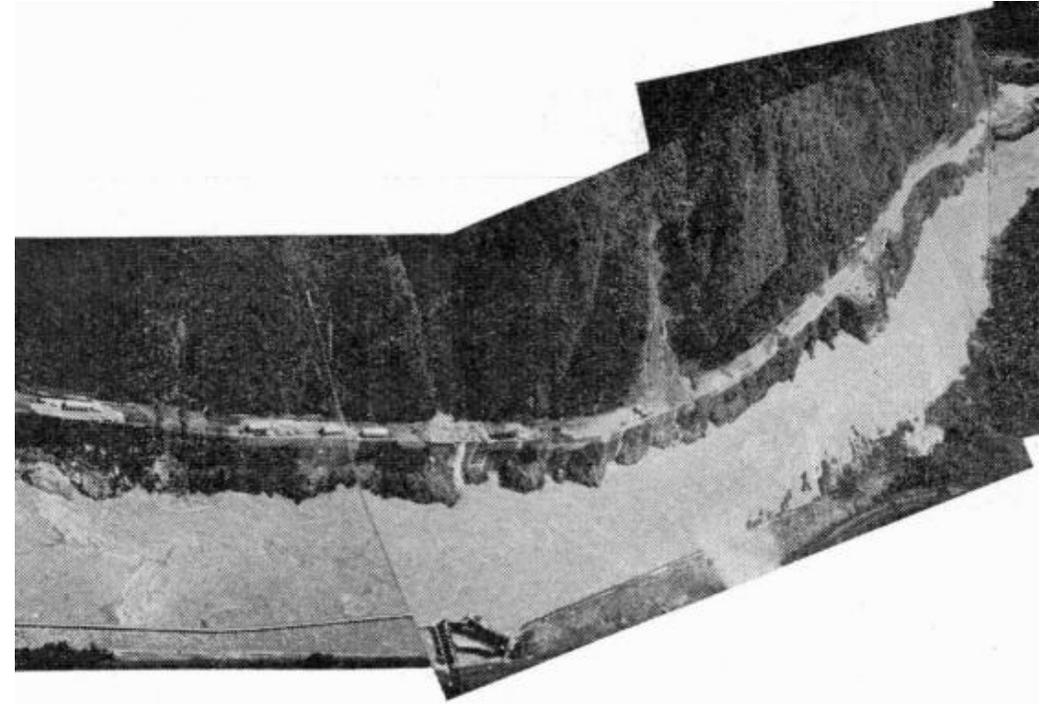
- 事前通行規制とは
 - ✓ 「大雨や台風による土砂崩れや落石等の恐れがある箇所については、過去の記録などを元にそれぞれ規制の基準等を定め、災害が発生する前に「通行止」などの規制を実施し、道路を利用する皆様の安全を確保します。」
 - <https://www.mlit.go.jp/road/bosai/jizenkisei/kisei.html> より

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

事前通行規制の変遷

事前通行規制制度の歴史*

- 飛騨川バス転落事故を契機に、一般道路に導入
 - ✓ 昭和43年8月18日に岐阜県加茂郡白川町の国道41号で発生
 - ✓ 国道を通行中の観光バス2台が巻き込まれ、並行する飛騨川に転落した事故で、乗員・乗客104人が死亡した道路災害
 - ✓ 昭和44年に事前に区間を指定して異常気象時に通行止めを行う制度（事前通行規制制度）が整備
- 転落事故以前の道路管理
 - ✓ 道路法第46条に基づき、災害等で道路が損壊してから、通行止め措置を行うことが一般的



飛騨川バス転落事故
(尾崎・伊藤, 1968)より抜粋

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

*尾崎，伊藤，1968.：8.17豪雨災害およびバス転落事故について，地すべり，Vol (5), No. 2, pp. 34-40.

事前通行規制の変遷

指定区間内に標識を設けることで注意喚起を行う



初の事前通行規制区間（岐阜新聞Web）

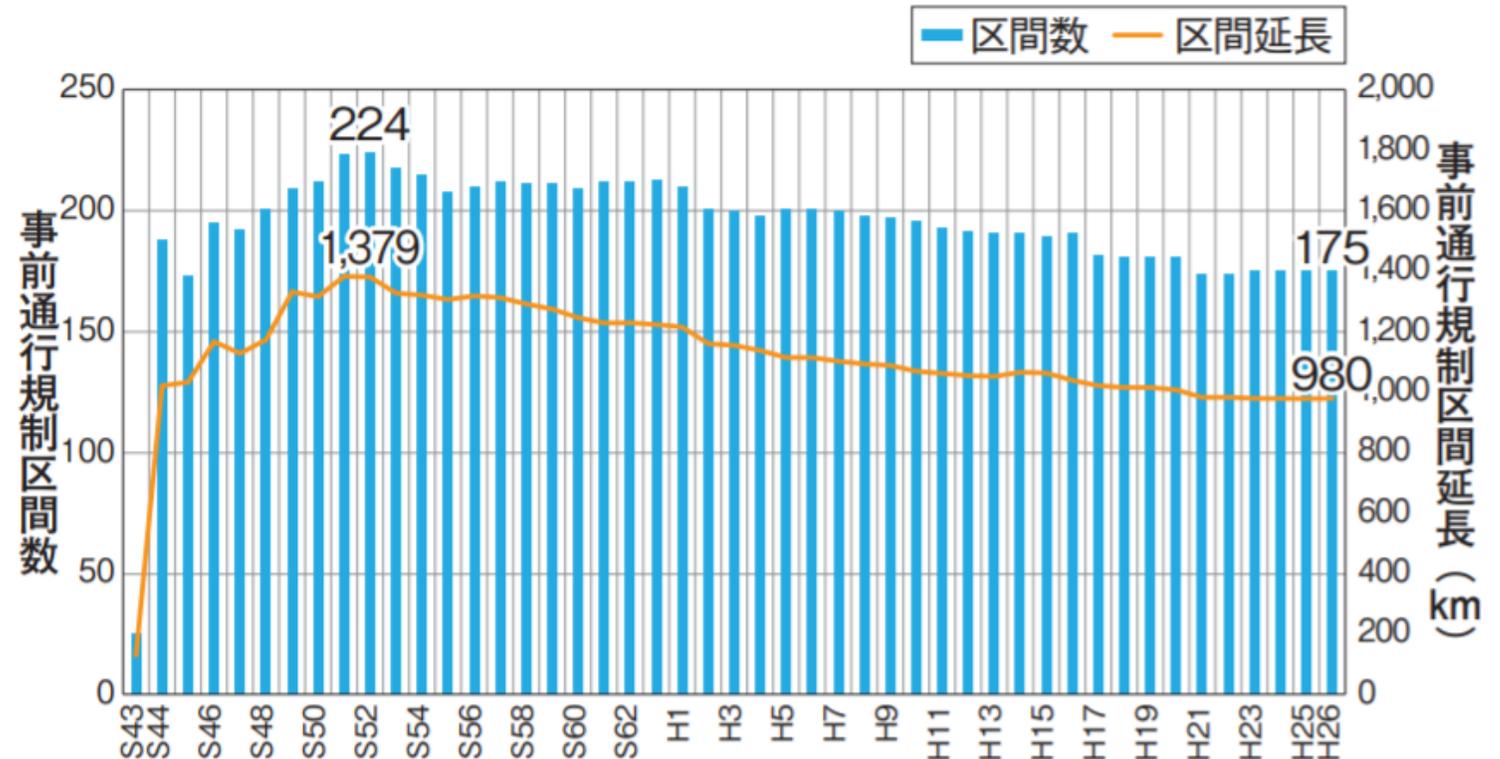


事前通行規制の様子（国土交通省）

事前通行規制の変遷

事前通行規制区間の指定はH27年4月時点で減少傾向

- 昭和 50 年代前半から、ピークの昭和 52 年度には 224 区間1,379km が指定。
- 各区間で法面防災対策が実施
 - ✓ 事前通行規制区間の安全性向上に伴い、規制区間は解消され、平成 27 年 4 月現在では、175 区間 980km
- 高速道路も同様に規制区間の適正化が図られている



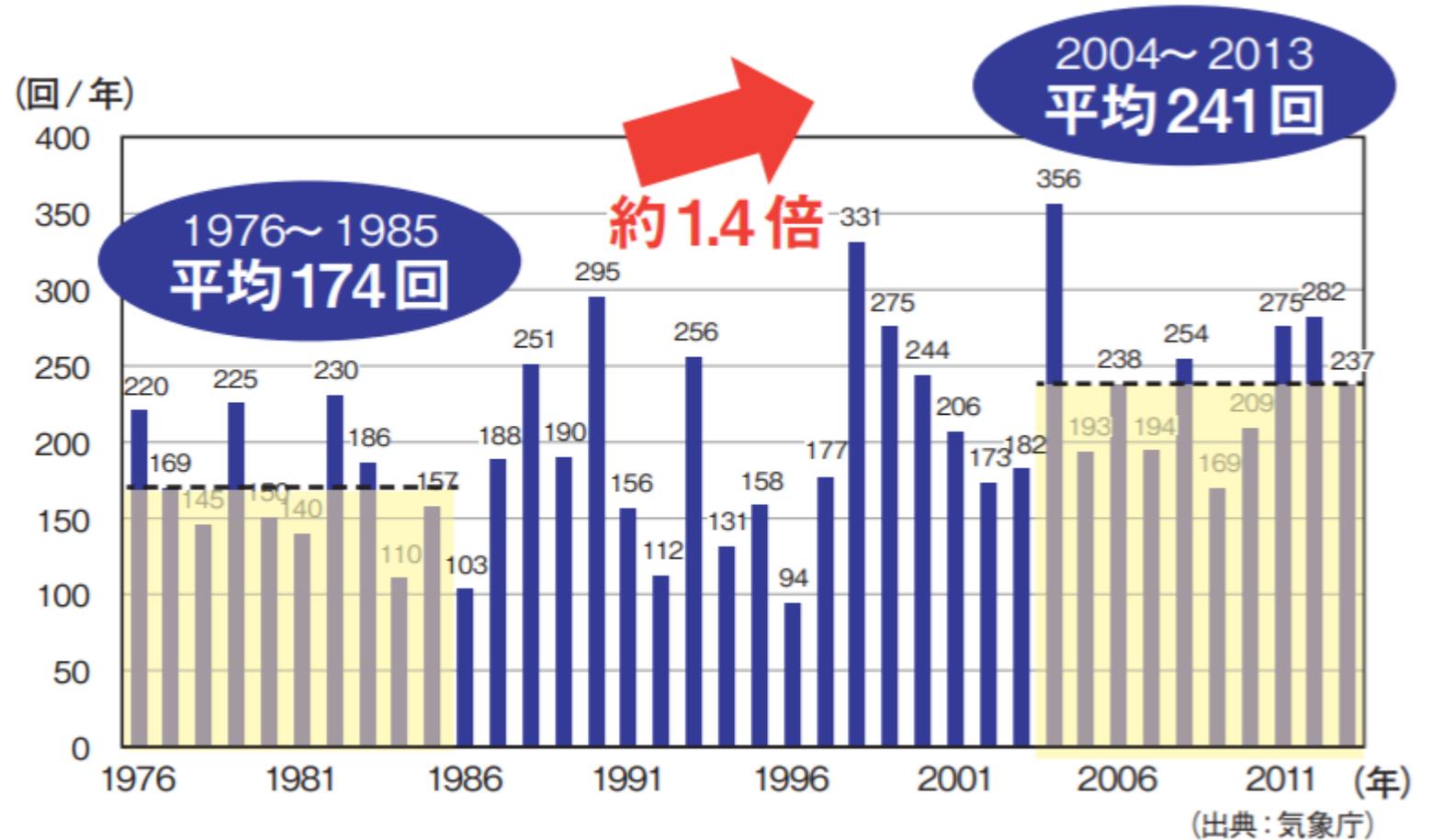
事前通行規制区間数・延長の推移（直轄国道）*

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015。

事前通行規制の変遷

事前通行規制制度の歴史*

- 近年の気象条件の変化に伴い、事前通行規制の考え方を高度化する必要性が生じる
 - ✓ 「短時間集中豪雨といわれる時間 50mm を上回る降雨が、最近 30 年間で 1.4 倍に増加している等、雨の降り方が局地化、集中化している。」*



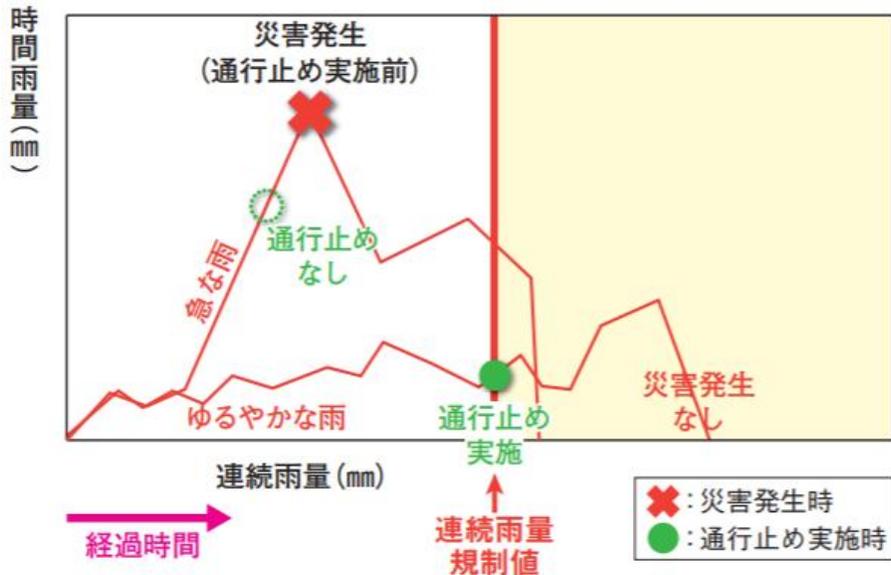
1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数 (アメダス 1,000 地点あたり) *

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

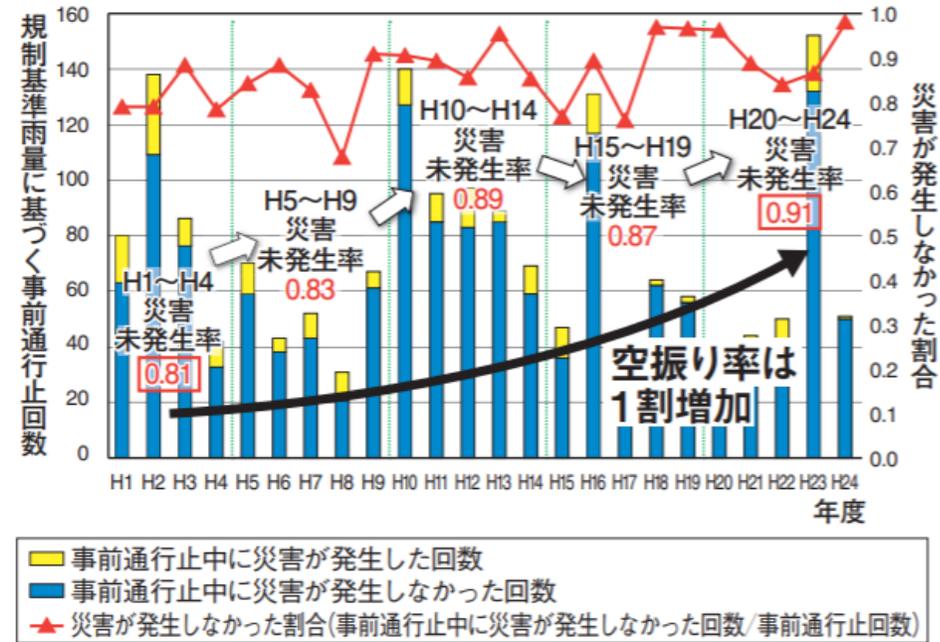
雨量規制基準の種類

区間ごとに定められた雨量の累積基準値により判断する連続雨量法

- 3時間 無降雨 (or 2 mm/h以下) が継続した場合に, 累積をリセット
 - ✓ 単純な規制判断の一方, 降雨強度を考慮できず, 先行降雨の影響が見込まれない場合があるため「空振り」が増加する傾向がある



連続雨量法による規制の概念図*



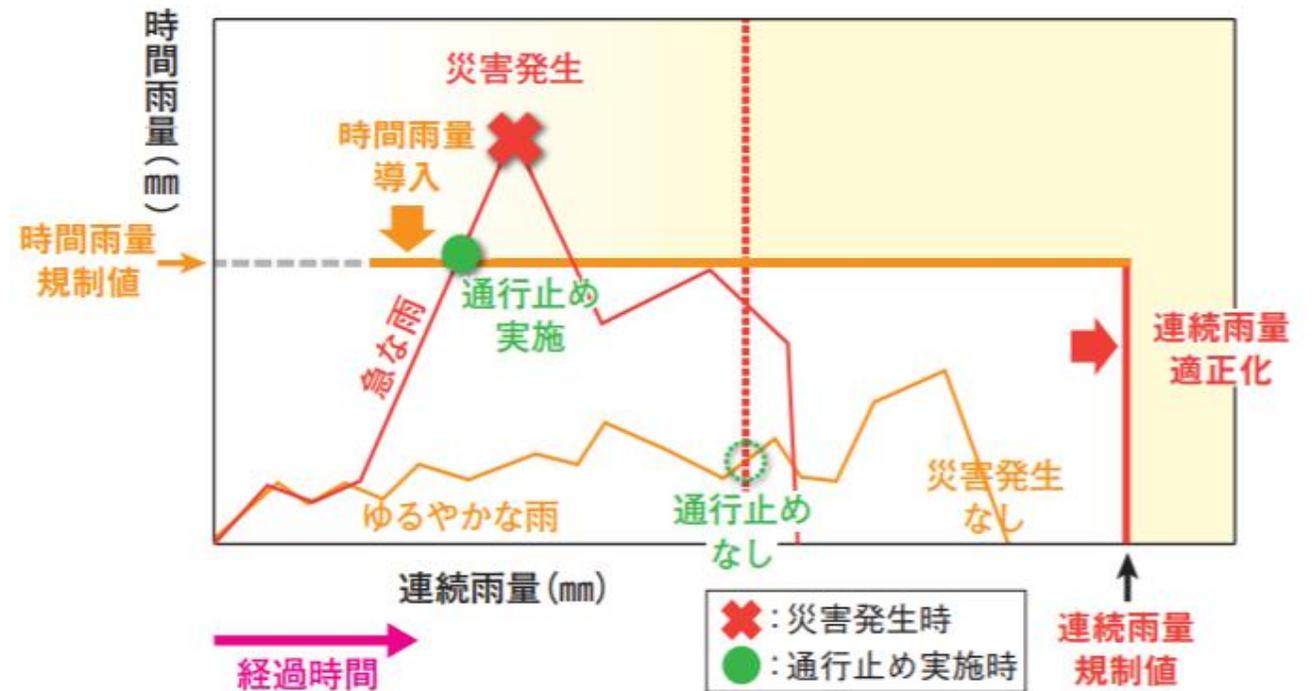
事前通行規制区間における空振り率の上昇 (直轄国道) *

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

雨量規制基準の種類

連続雨量及び時間雨量の併用法

- 規制のかけやすい高速道路に一般的に用いられている規制基準
- 連続雨量法では対応が難しい短時間の局所的・集中的豪雨への対応を，時間雨量により補う
- 迅速な通行止めができる道路等に対しては，導入が可能
 - ✓ 出入口が制限
 - ✓ 料金所に 24 時間人員が配置



連続雨量及び時間雨量の併用法による規制の概念図

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

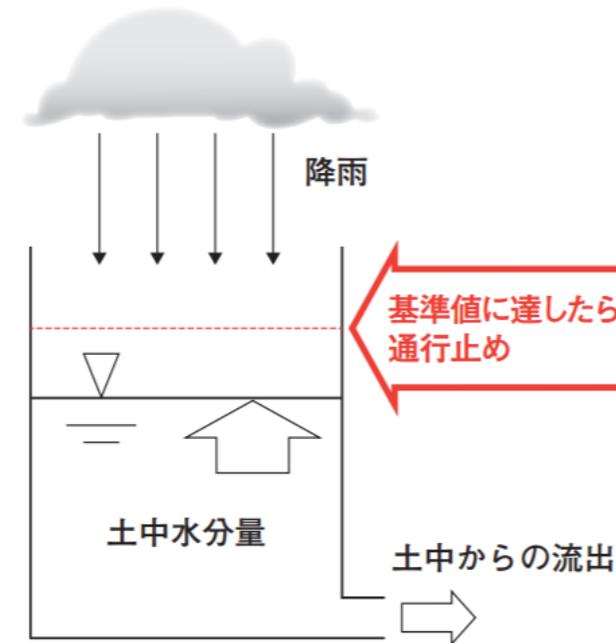
雨量規制基準の種類

雨量の累積により判断する連続雨量法

- JR等の鉄道で用いる規制基準の設定方法
 - ✓ 土壌中の水分量を近似的に表現**
- 土中の水分量を基準値とする規制方法
 - ✓ 土砂災害のメカニズムと一定の合理性
 - ✓ 前述の方法と比較して、災害発生と雨量との関係を精度高く予測し規制できる方法
- データ構築と指標間の相関性が課題
 - ✓ 20年程度のデータを蓄積してモデルを構築
 - ✓ 降雨量、土中の水分量、災害発生との関係
 - ✓ 地形・地質等の状況により相関の判断が困難

$$R_w = \sum_i 0.5^{i/T} R_i$$

実効雨量の定義式 (矢野, 1990)



実効雨量法による規制の概念図*

*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015。

** 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門：実効雨量について，<https://sip4dkit-web.bosai.go.jp/rain/effectiverainfall/> (2022/04/13)

目次

- 異常気象時における事前通行規制とは？

- ✓ 災害リスクの回避と監視コストをバランスさせる時間的・空間的な適正化の必要性

時間雨量・累積雨量の併用：先行降雨の影響，地形・地質の影響は考慮できず，
新基準の枠組みの必要性と，方法論を提示（小山，2016：鳥居，2018）

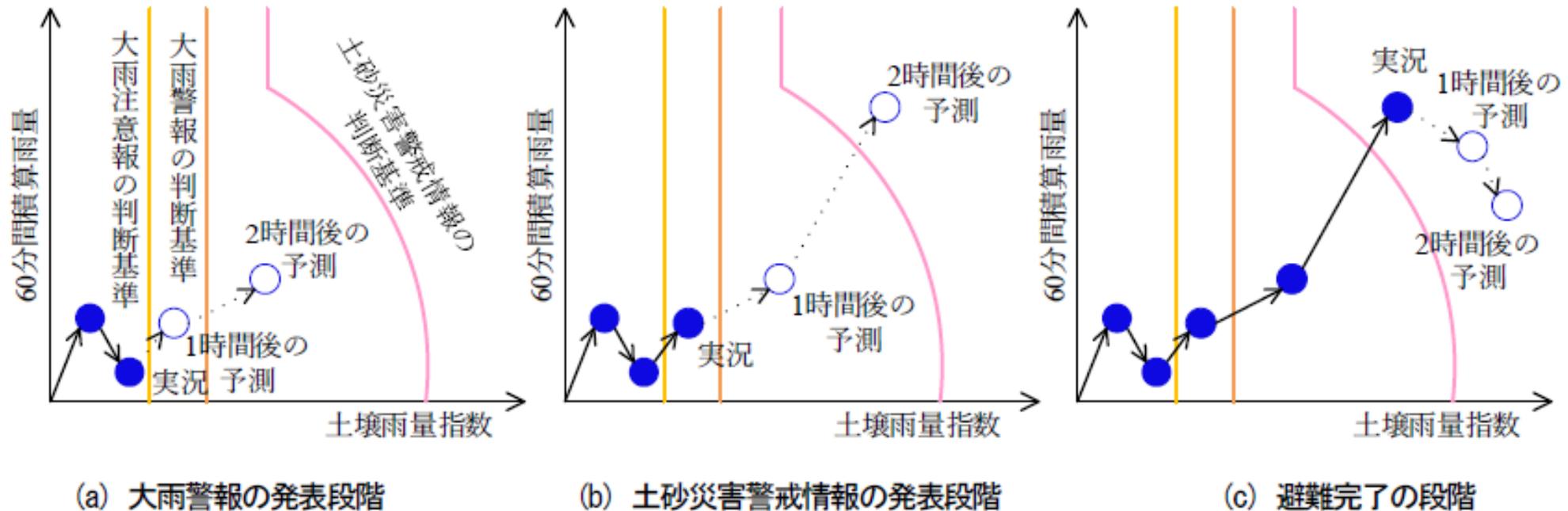
- 時間的・空間的な適正化に向けた土壌水分量指標に基づく新基準の提案

- ✓ スネーク曲線（土壌雨量指数と時間雨量の履歴曲線）と警戒基準による通行規制及び解除

- 小山 倫史. 降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究 研究成果報告書, 国土交通省近畿地方整備局, 新都市社会技術融合創造研究会, 2016
- 鳥居宜之. 事前道路通行規制区間の解除のあり方に関する研究 研究成果報告書, 国土交通省近畿地方整備局, 新都市社会技術融合創造研究会, 2018.

土砂災害警戒情報の仕組み

- 時々刻々と変化する土壌雨量指数と60分間積算雨量を二軸グラフ上に描画し、数時間後の予測位置と警戒判断基準線との関係で、警戒情報を発表する

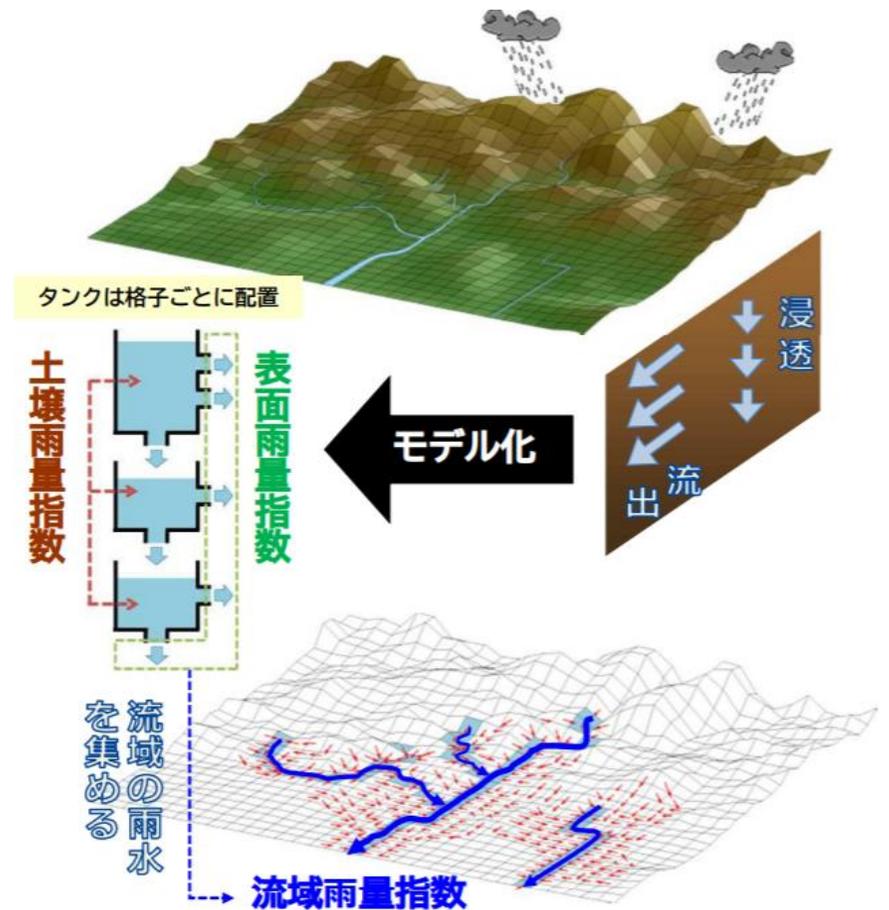
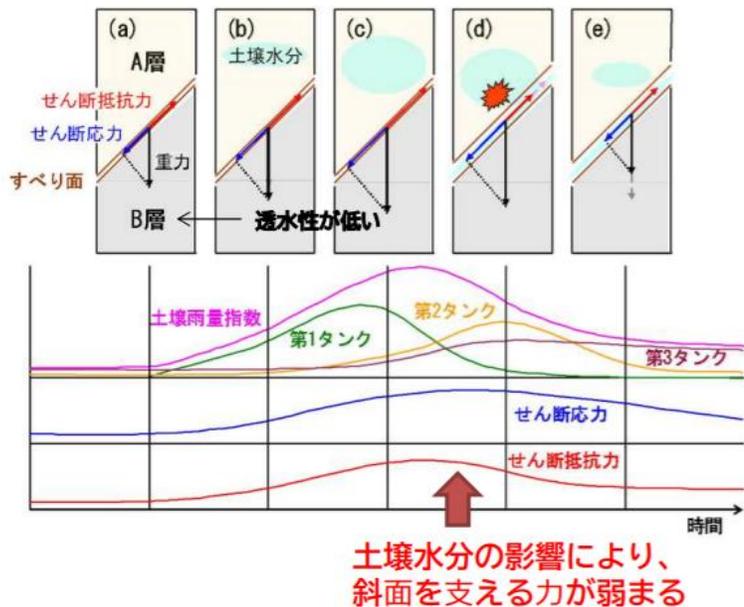


土砂災害警戒情報発表の仕組み*を基に作成

気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について、平成30年2月28日、気象等の情報に関する講習会*

土砂災害警戒情報の仕組み

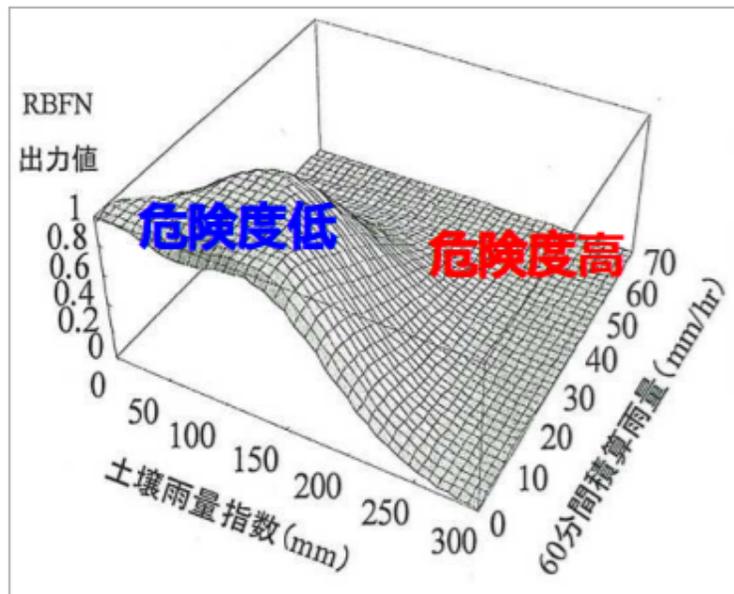
- 土壌雨量指数は、
5 kmメッシュの領域における
土壌水分量を表す指標



気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について、平成30年2月28日、気象等の情報に関する講習会 より

土砂災害警戒情報の判断基準線の決め方

降雨発現確率の応答曲面

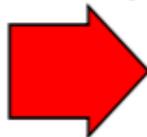


- RBFNとは、データ補間手法（有限個のデータから近似関数を導く）の1つで、Radial Basis Function Network（放射基底関数）の略。
- RBFNを用いて、有限個の降雨事例データから「非発生降雨の発現確率」を求め、その確率分布をもとに基準線を設定する。

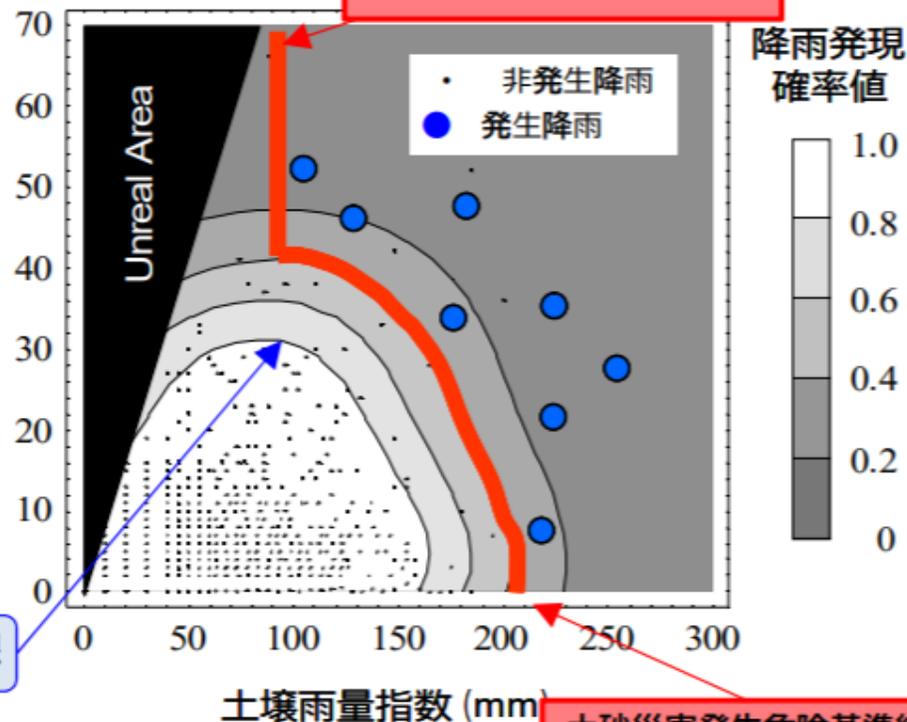
平面上において、非発生降雨データが密な領域ではRBFN出力値が高く、疎らな領域ではRBFN出力値が低くなる。

土壌雨量指数による下限値

2次元化



60分間積算雨量(mm/hr)



等RBFN出力値線

土砂災害発生危険基準線
(Critical Line)

気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について、平成30年2月28日、気象等の情報に関する講習会 より

土砂災害警戒情報と警戒指針

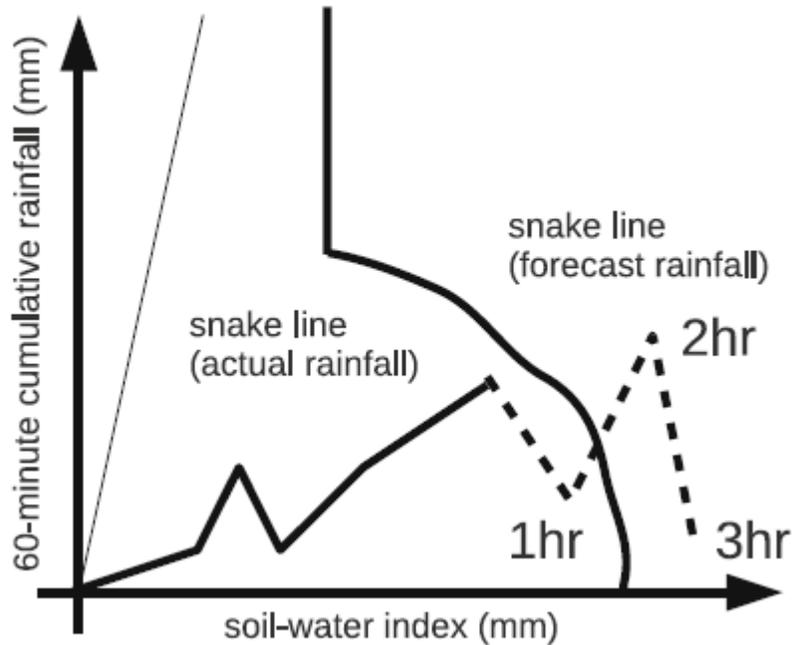


Fig. The evolution of the “snake line” under actual operational conditions, with projection using forecast rainfall over the next 1–3 h*

*Osanai, et al., 2010.: Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network, Vol.7, pp.325-338.

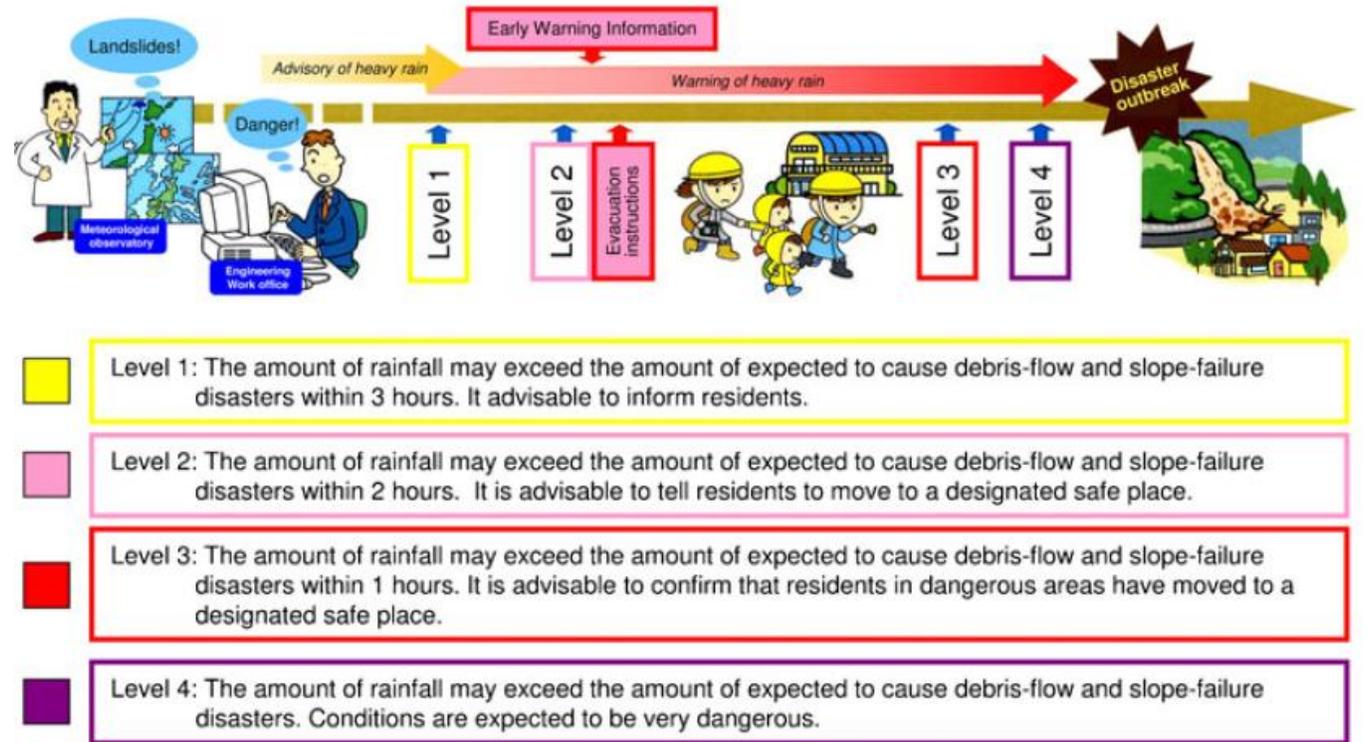


Fig. The colors are coded to show the condition indicated by the danger level, and the action that is recommended be taken*

道路交通における斜面災害リスクを緩和する

降雨量のみを判断指標とする連続雨量による通行規制では、
「見逃し」となった事例

斜面内の水分量指標を用いた土砂災害警戒情報に基づく
パトロールによって「見逃し」を防いだ

累積の雨量だけでなく、時々刻々と変化する斜面の水分状態を補足した監視が必要

「令和2年7月8日の早朝、枚方亀岡線において、道路の山側法面の土砂・倒木が崩落し、延長約50メートルにわたって2車線を塞ぐとともに、道路を越えて谷側の民有地にも到達。」

(引用元；大阪府：<http://www.pref.osaka.lg.jp/ibarakidoboku/xyz/index.html>)

斜面内の水分量を考慮した通行規制の考え方の必要性

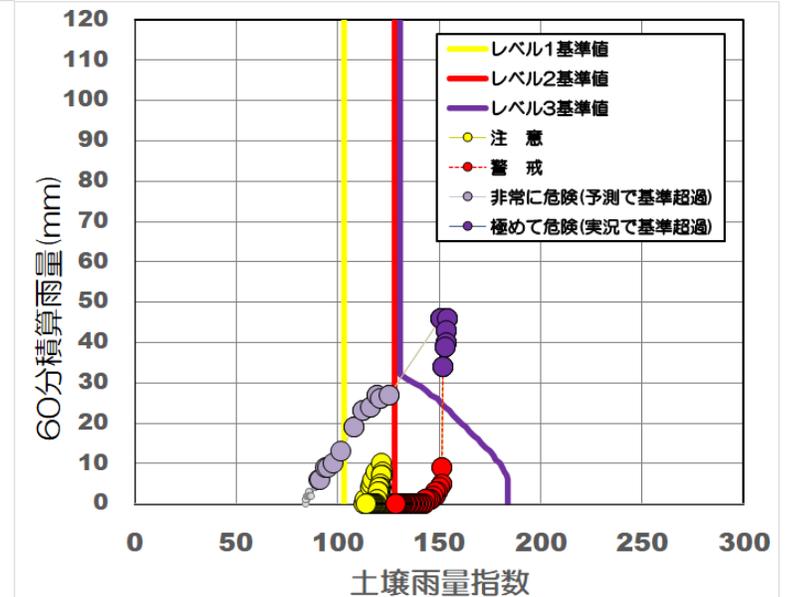
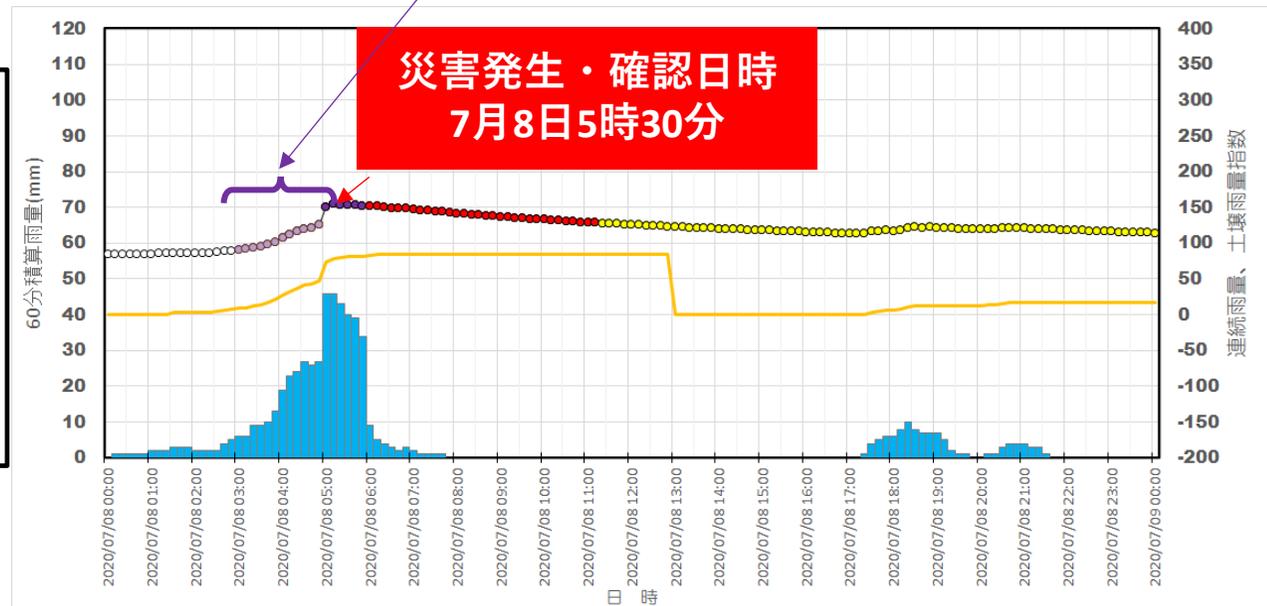
連続雨量による規制が発令されないまま災害が発生（枚方亀岡線）

【出灰:テレメータ雨量】

連続雨量max 85mm

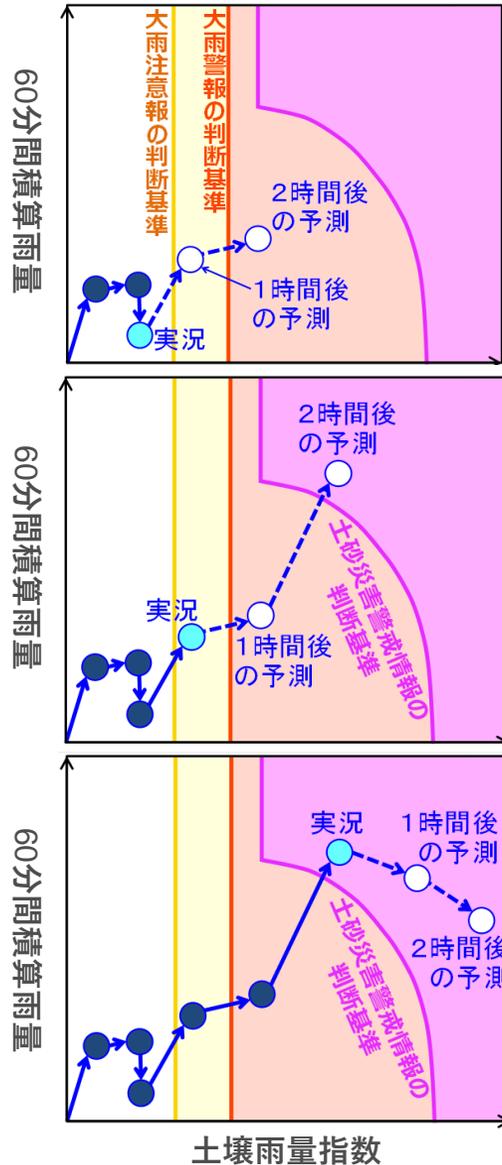
土砂災害CL:52353418

土砂災害の防災情報で「非常に危険」
到達を確認4時～5時頃



- 被災の発生時刻とスネークライン上の位置関係は不明であるが、従来法では「見逃し」

土砂災害警戒情報を道路監視用へ昇華させる



土砂災害警戒情報 運用例

2時間先までに大雨警戒
(土砂災害) の
基準に到達すると予測

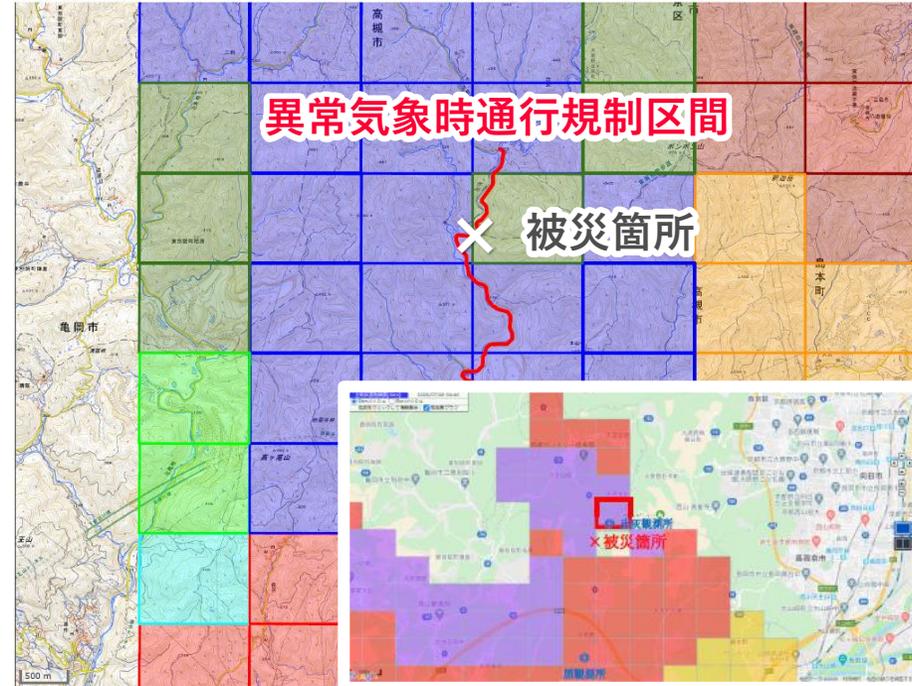
大雨警戒
(土砂災害) 発表
高齢者等は避難開始

2時間先までに
土砂災害警戒情報の
基準に到達すると予測

土砂災害警戒情報発表
避難開始

既に
土砂災害警戒情報の
基準に到達

地理院地図
GSI Maps



異常気象時通行規制区間への適用のイメージ

- 規制区間を含む各メッシュに対して、
1. 左図のスネーク曲線を地域性を考慮して描画し、
 2. 道路用の警戒基準に基づき、監視して、
 3. 通行規制の発令・解除の判断を行う。

土砂災害警戒情報を道路監視用へ昇華させる

道路監視への適用上の課題

1. 土壌雨量指数の妥当性の把握

- 異常気象時通行規制区間を対象に斜面を最小システムによりモニタリング
- Ishihara & Kobatake (1979)の直列3段タンクモデルに、監視区間の地質条件を考慮

2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

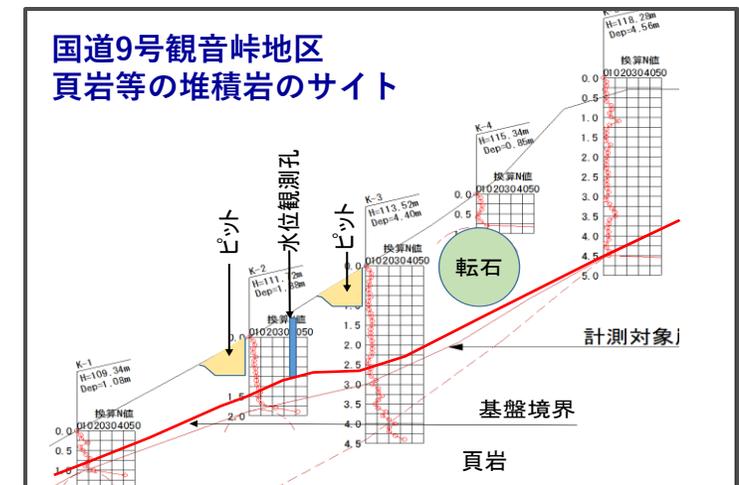
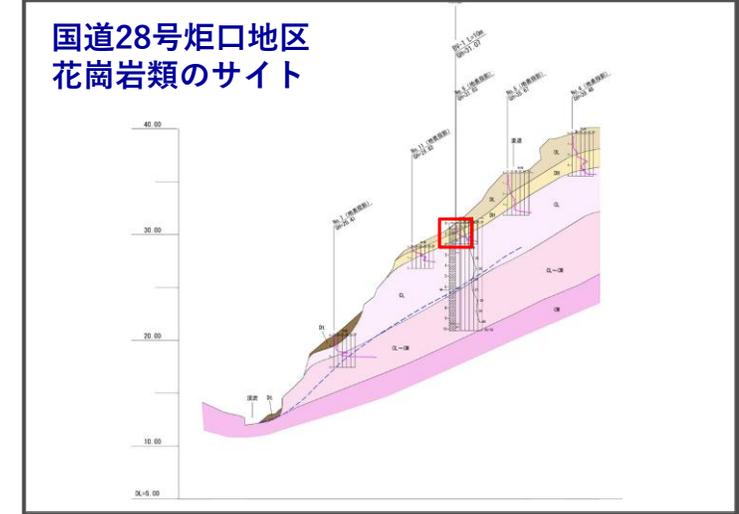
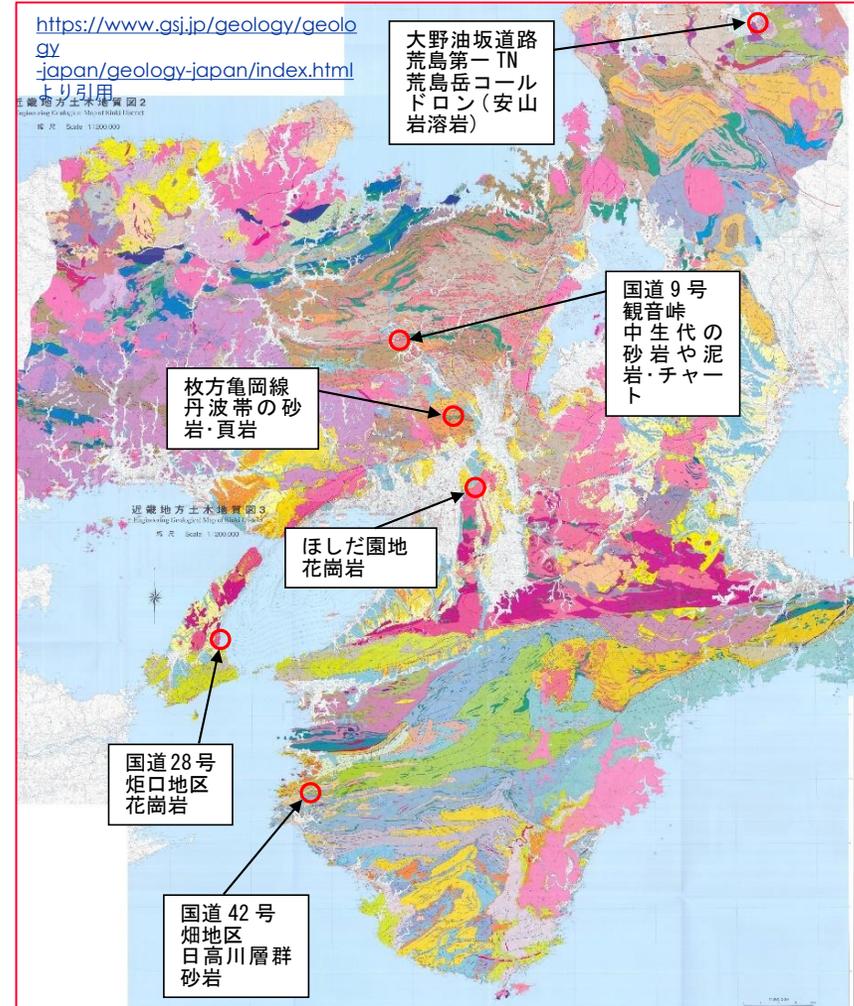
- 道路通行規制非発生降雨データに切り替えた道路用警戒基準へ
- 対策工を施した道路斜面に対する警戒基準の更新方法を検討

3. 警戒体制の社会実装

- 即時に実装可能な範囲から、システムの合理化を図る
- 土砂災害警戒情報と従来の連続雨量による規制の併用から施行を開始

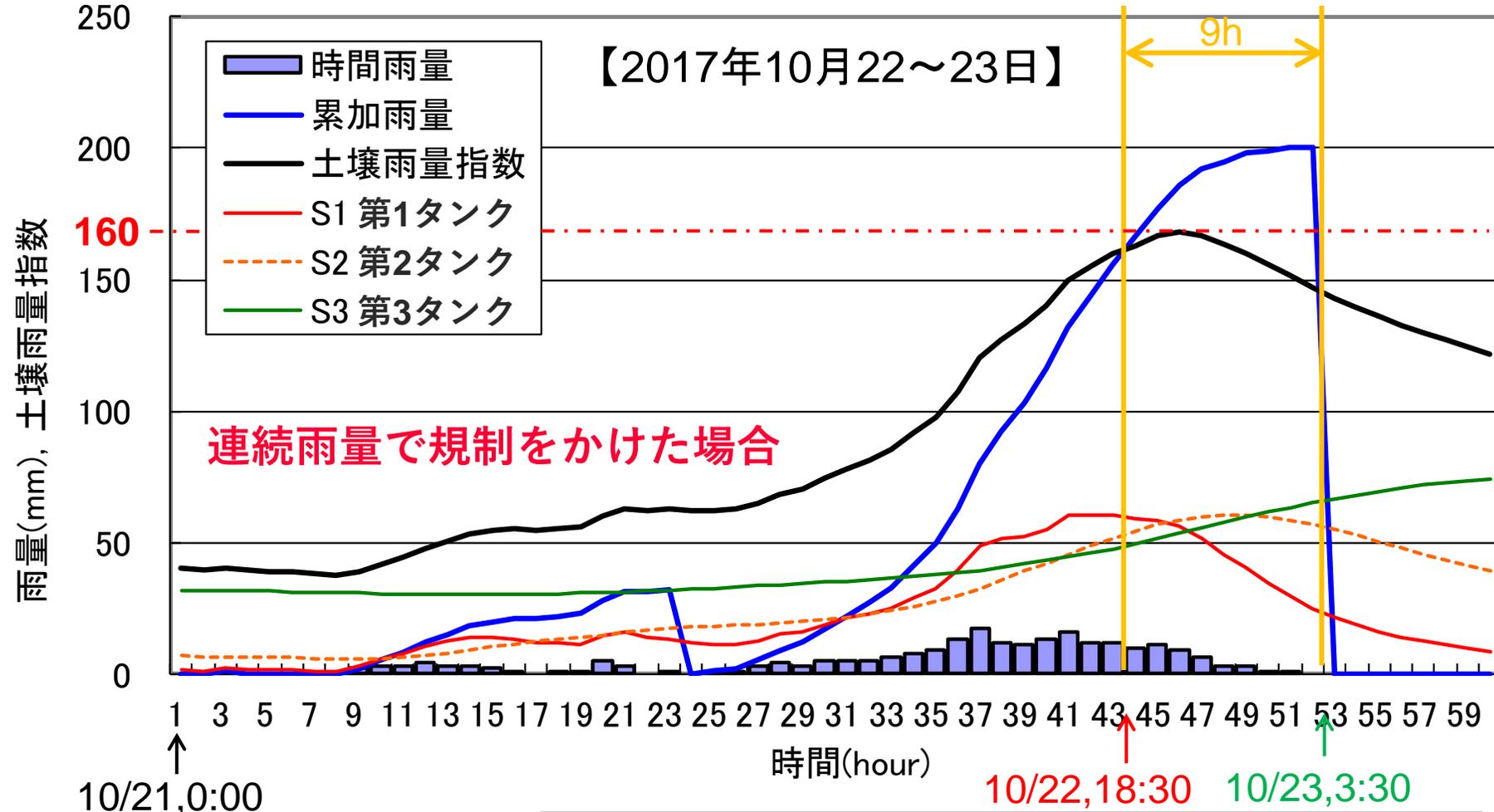
1. 土壌雨量指数の妥当性の把握

- 近畿の代表的地質構成の斜面2サイト（花崗岩類，堆積岩）において，最小計測システムによるモニタリング



2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

近畿地方整備局管内において、従来法と提案法の比較

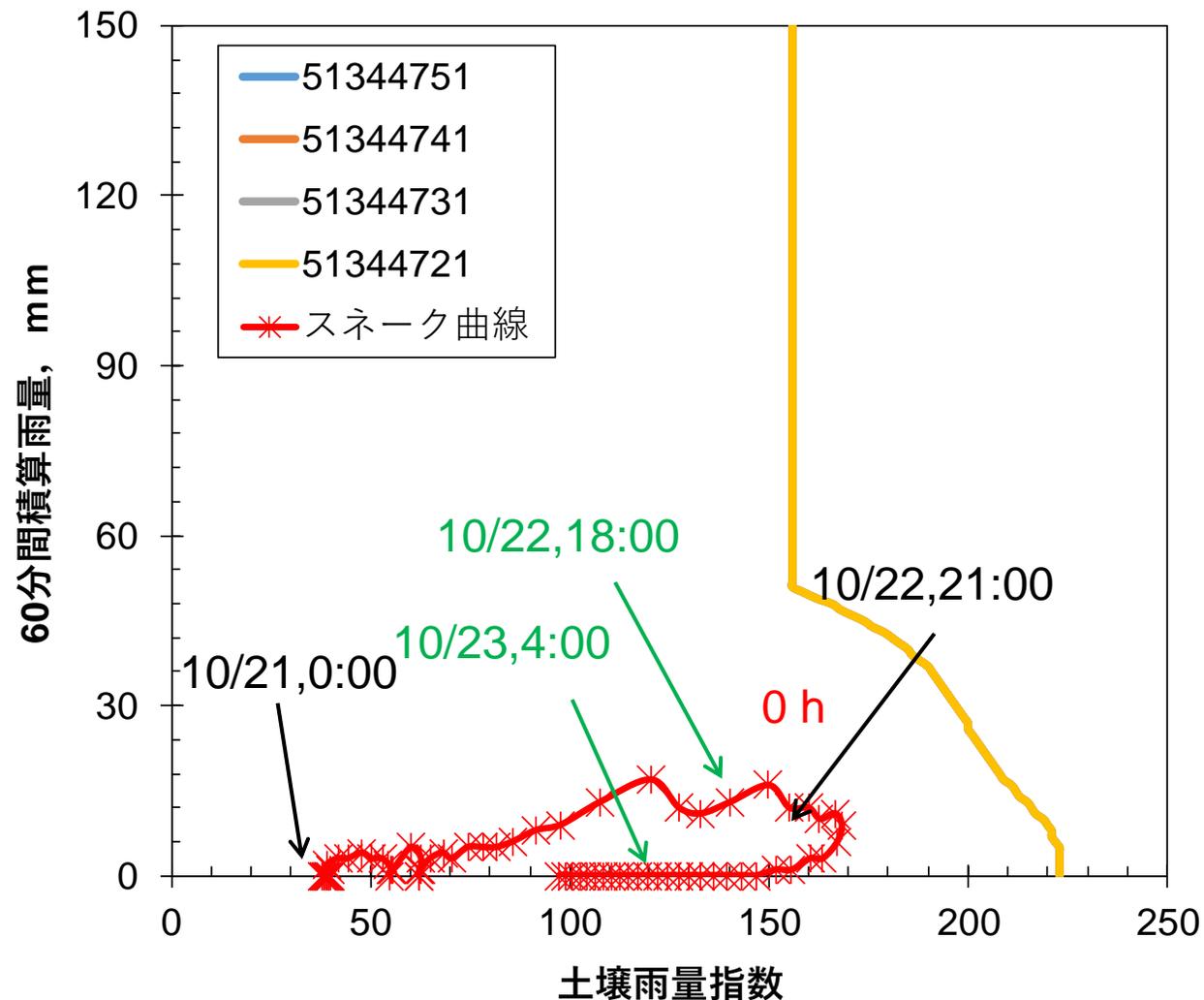


※通行規制の実績：10/22, 18:30－10/23, 3:30 (9h)

2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

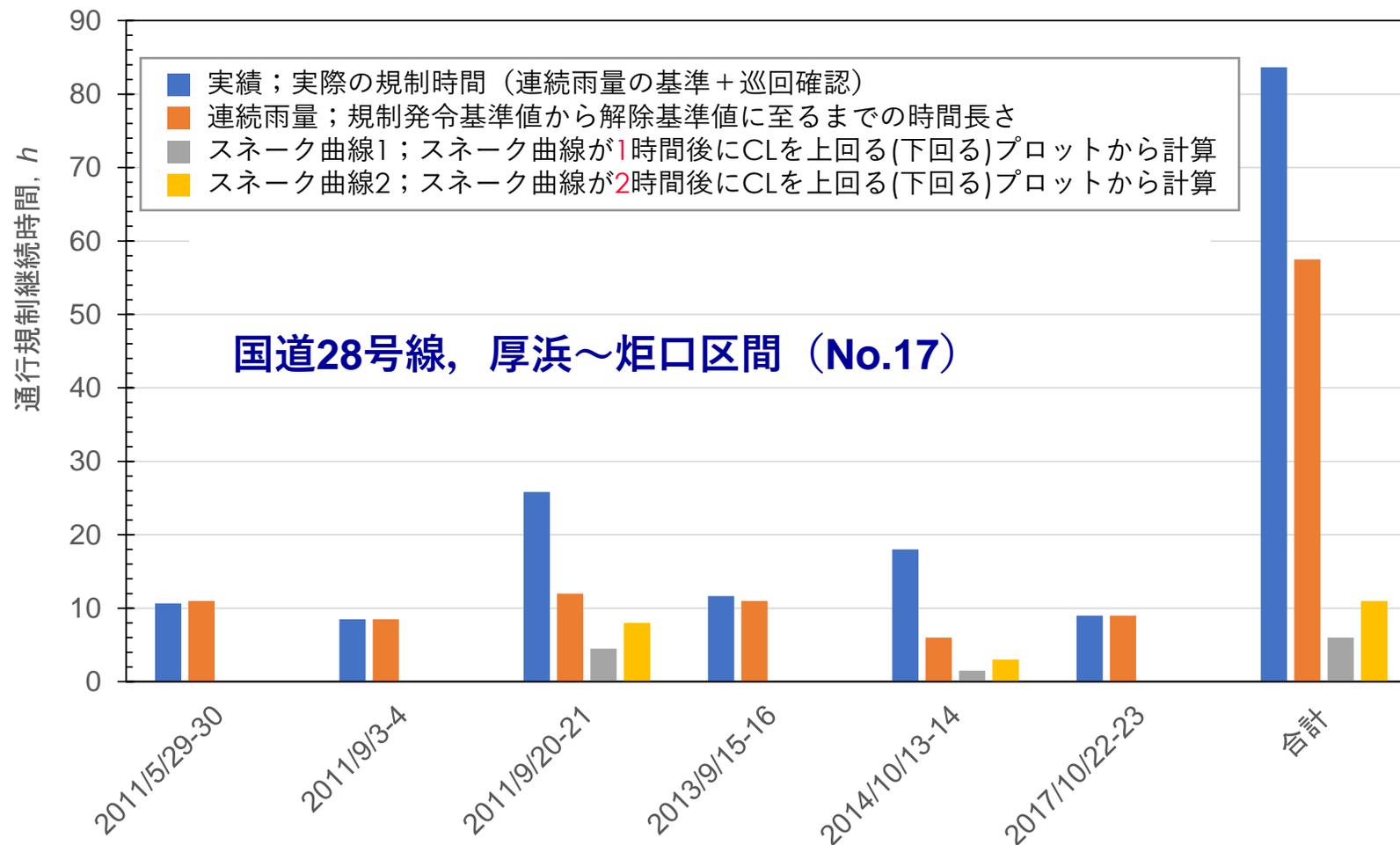
- 土砂災害警戒基準線 (CL) のみで規制を発令した場合
- 連続雨量で規制を発令した場合と比較して、「空振り」を回避した事例
- 傾向としては、規制時間が短くなる

【2017年10月22～23日】



2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- CLのみを規制・解除の判断に用いると、規制時間短期化
 - ✓ CLを繰り返し超過する例が課題；予測雨量による整理が必要



2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 道路通行規制非発生降雨データに切り替えた道路用警戒基準へ；道路用CL（Critical Line）
- 10分間降雨を基に2種類提案

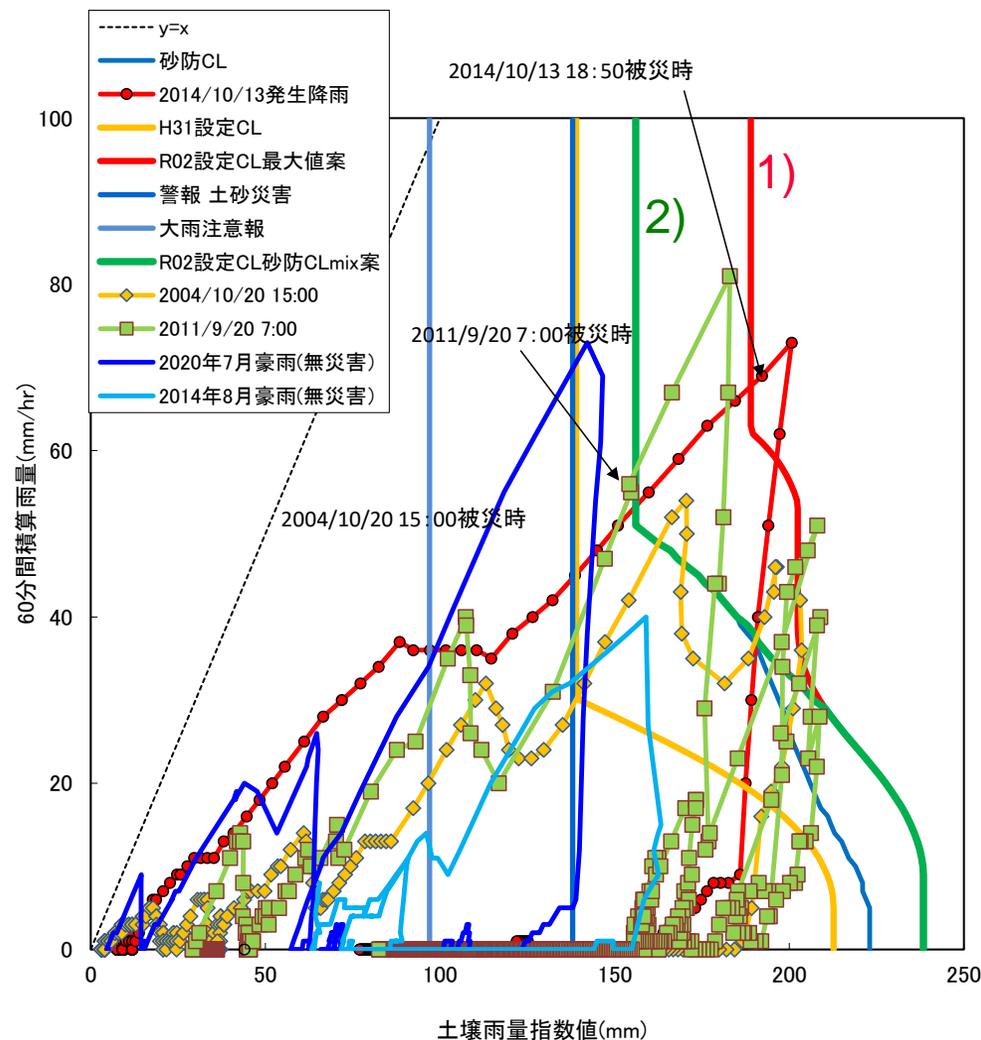
国道28号炬口地区に関して、

1. 被災実績を考慮した最大CL

災害発生降雨（2014年10月20日）時の土壌雨量指数と60分積算雨量がCLを超過する条件でCLを設定

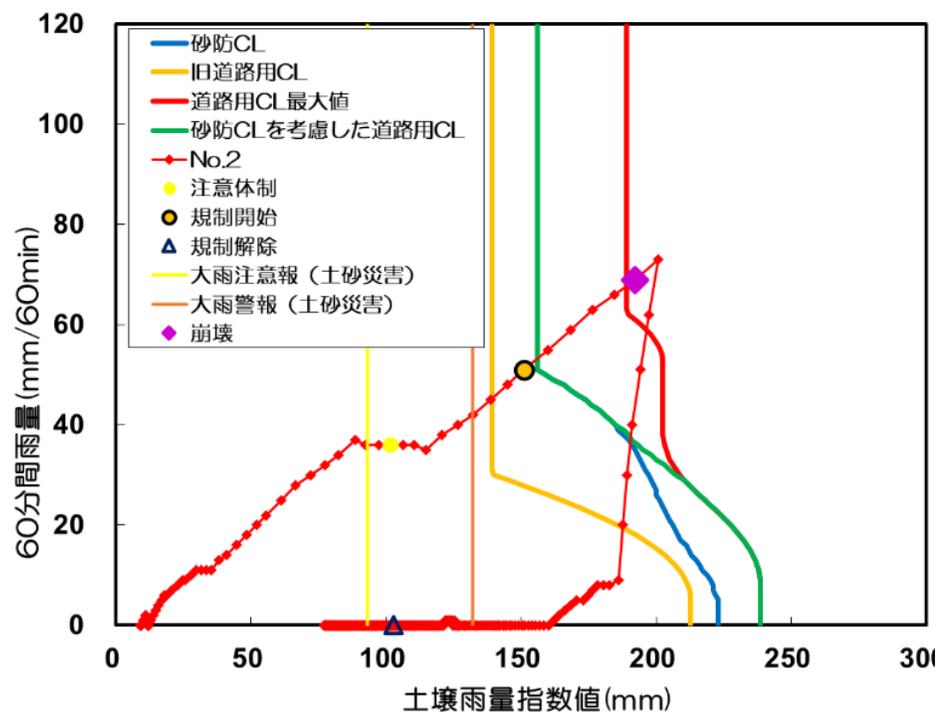
2. 砂防CLを考慮したCL

これまでの無被災の降雨を包括したうえで、小規模な土砂流出現象も評価できるように、1)のCLをやや低めに設定した案

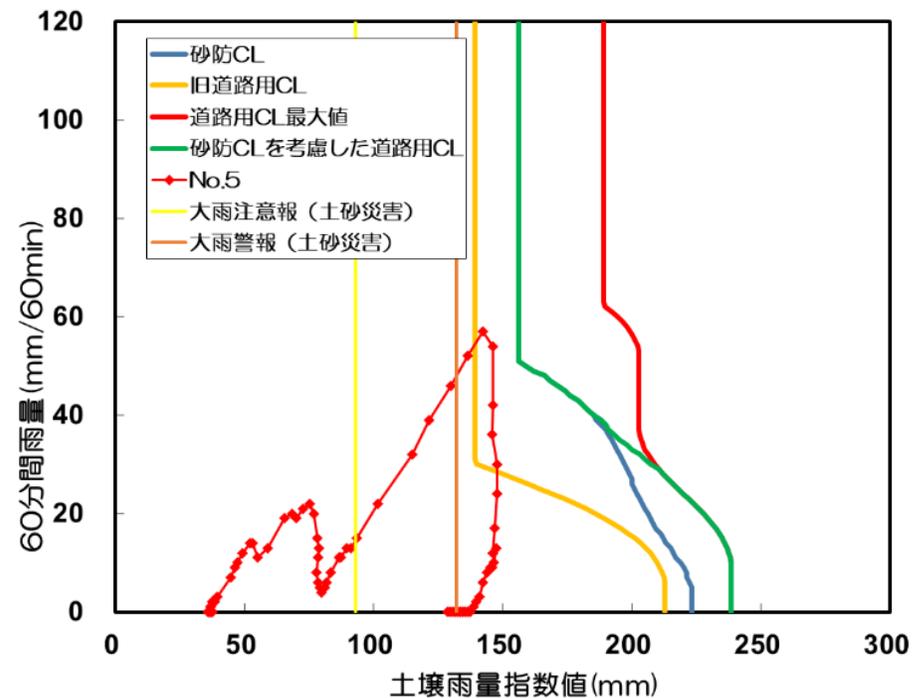


2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 改善を加えた2種CLは、旧道路用CL（H31 CL）と比較し、被災実績を包括しつつ、過去の「空振り」を回避



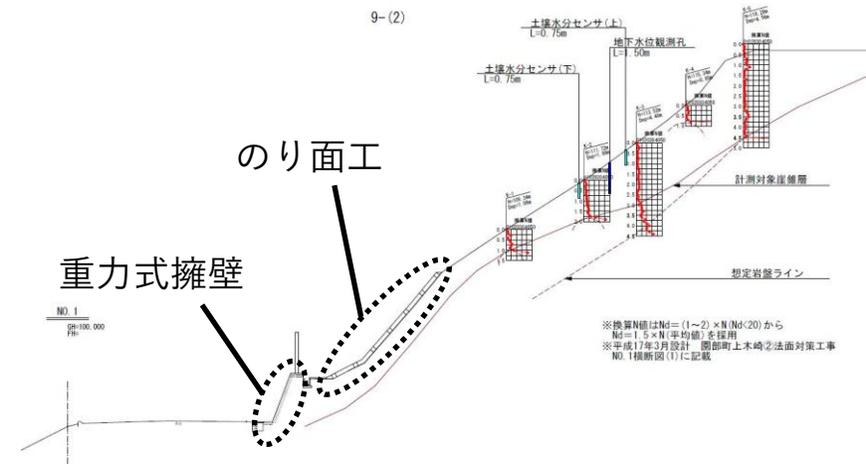
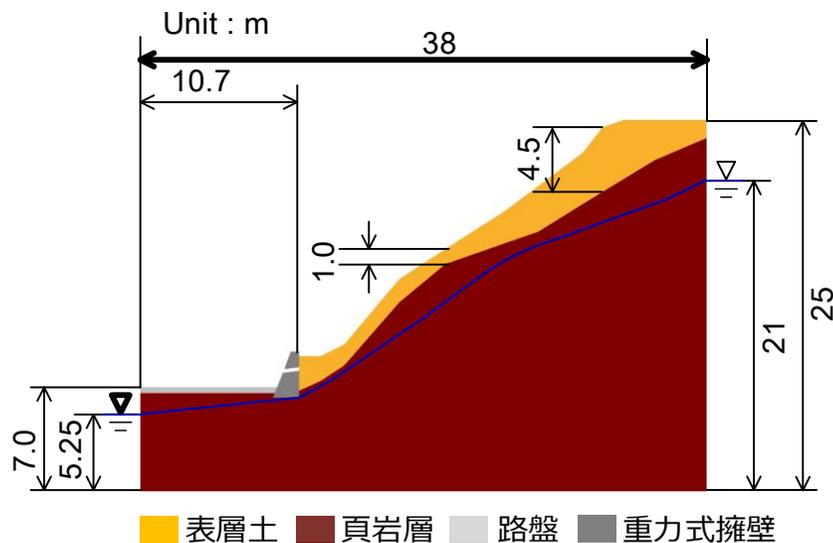
被災実績あり（2014年10月13日）



通行規制なし（2016年9月20日）

2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

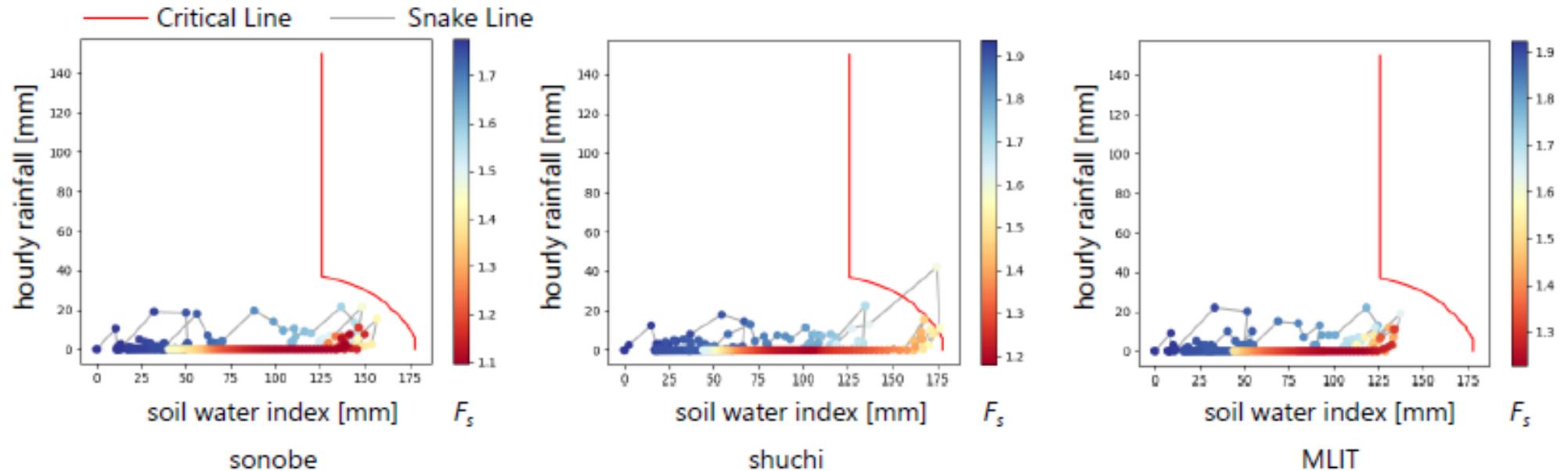
- 対策工直後の斜面に対してCLを更新する場合、過去の最大の災害非発生降雨を超える降雨を経験する必要有
- 対策工済みの斜面に対し、浸透流解析と円弧滑り解析を組み合わせ、スネーク曲線上の斜面の安全率を直接評価する更新方法を提案



観音峠地区のモニタリング斜面 横断図

2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 平成30年7月豪雨に対して、想定した円弧滑り面に対し、
現行の砂防CLを越える範囲で安全率1を下回ることがないことを確認
- CLを超過する範囲で災害非発生降雨データを収集することができ、
これに基づき対策工済みの斜面におけるCLの更新が可能といえる



園部・須知・国交省テレメータ 観測降雨データによる計算結果（平成30年）
想定した円弧滑り面とスネーク曲線上の安全率の推移（Fukuoka et al, 2022）

まとめ

- 異常気象時における事前通行規制とは？

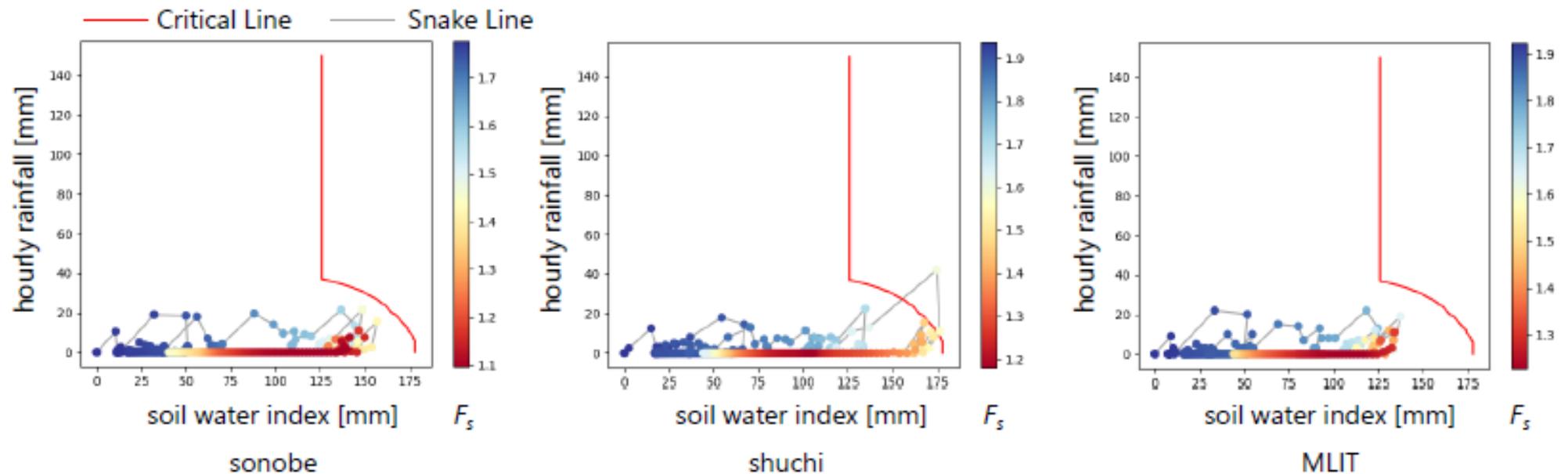
- ✓ 災害リスクの回避と監視コストをバランスさせる時間的・空間的な適正化の必要性

スネーク曲線（土壌雨量指数と時間雨量の履歴曲線）と任意の警戒基準による運用

- 時間的・空間的な適正化に向けた土壌水分量指標に基づく新基準の設定方法

- ✓ 過去の通行規制事例分析に基づく，時間的・空間的に適正な通行基準を決める

時間雨量（降雨特性）・土壌雨量指数（浸透特性）・安全率 or 変形量（変位情報）の多層化



主たる参考文献

- 国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.
- 気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について，気象等の情報に関する講習会，2018.
- Ishihara, Y. and S. Kobatake (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., 29, 27-43
- 国土交通省道路局国道・防災課道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の施行，2015.
- 松四雄騎：豪雨と崩壊；山地の斜面災害を知る，京都大学防災研究所公開講座
- 小山倫史：降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究，2016.
- 小山ら：国道沿い斜面を対象とした数値解析と実効雨量を組み合わせた雨量通行規制基準の提案，2015.
- 鳥居宣之：事前通行規制区間の解除の在り方に関する研究，2018.
- 小原公克：土砂災害発生危険度の解析・予測技術，2018.

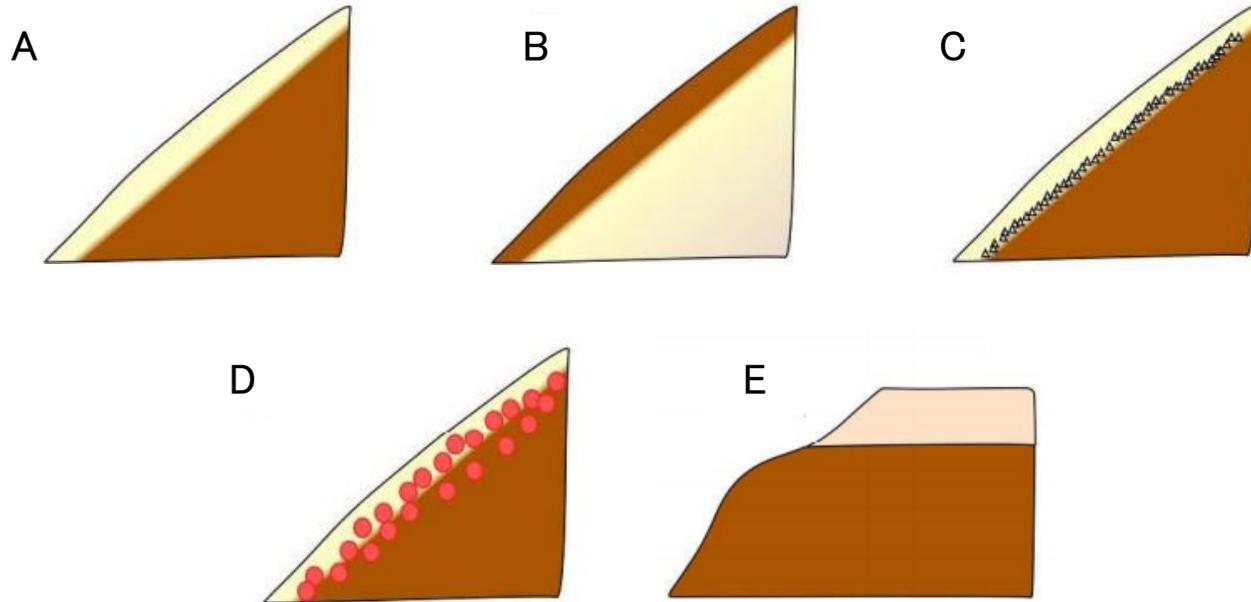
写真測量を活用した予兆現象の可視化

以降に示す本講演会の資料は、公益信託 NEXCO関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金 令和2年度高速道路の防災対策、災害支援等の研究機関への助成による研究成果である。

ここに記して謝意を示す。

降雨による斜面崩壊を如何に予防・予知するか

比較的日本列島で雨による表層崩壊が発生しやすい地質構造に着目

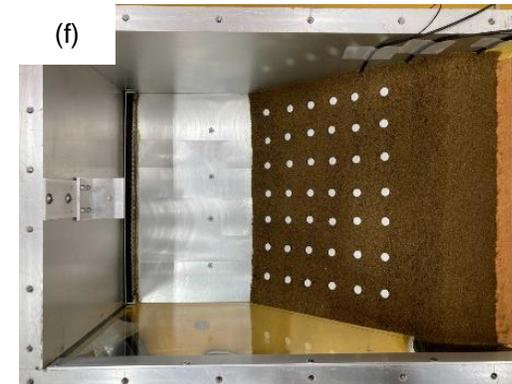


- A) 表層の風化帯がルーズな土層となり、明快な境界を介して、下の硬質・難透水の岩盤と接する場合
- B) 表層の風化帯が細粒で、明瞭な境界を介して、下の粗粒な物質と接する場合
- C) 表層堆積物基底に水道がある場合
- D) 表層部が球状風化によるコアストーンとまさからなる場合
- E) 水平に近い地層で、下部が低透水性で、上部が高透水性の場合

日本列島で生じた雨による表層崩壊が発生しやすい斜面表層の構造 (千木良, 2018)

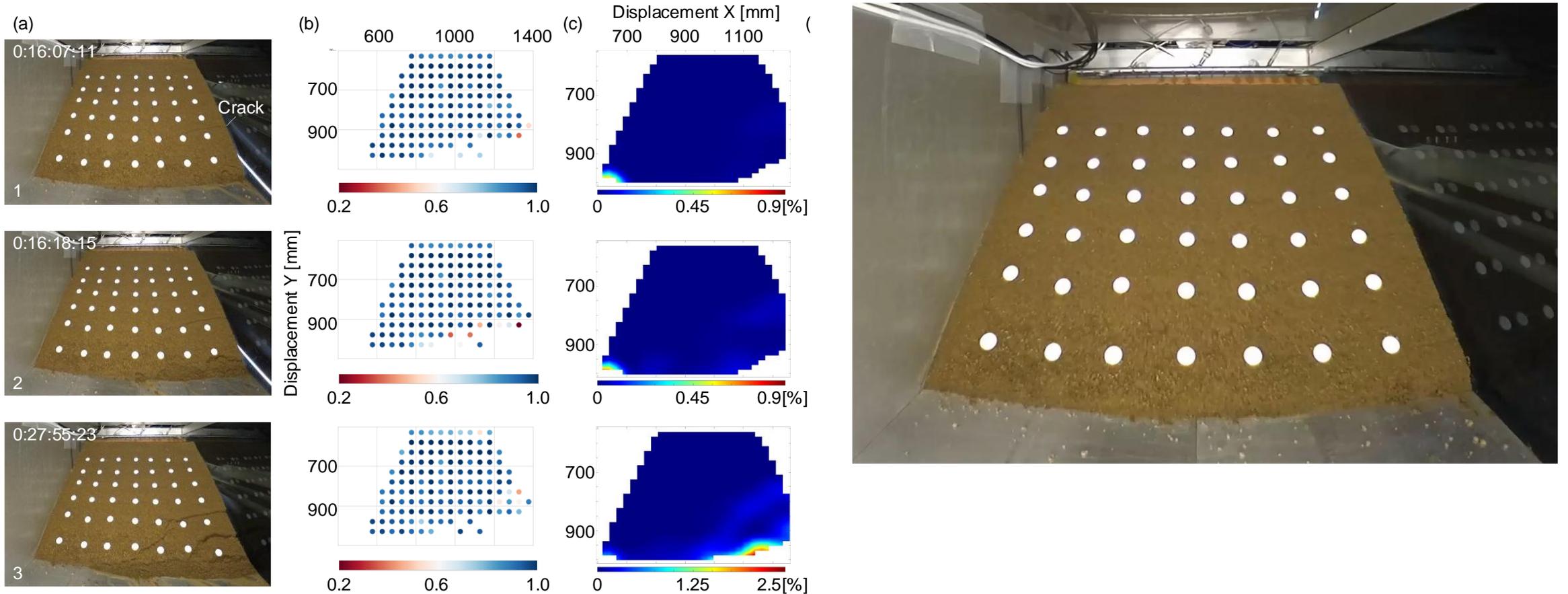
実験条件

斜面模型の作成手順は江戸崎砂による作成手順と同様；珪砂 7 号は含水比10%に調整



R2：観測事例の多い斜面崩壊タイプを対象とした、再現性の高い斜面崩壊実験の実施

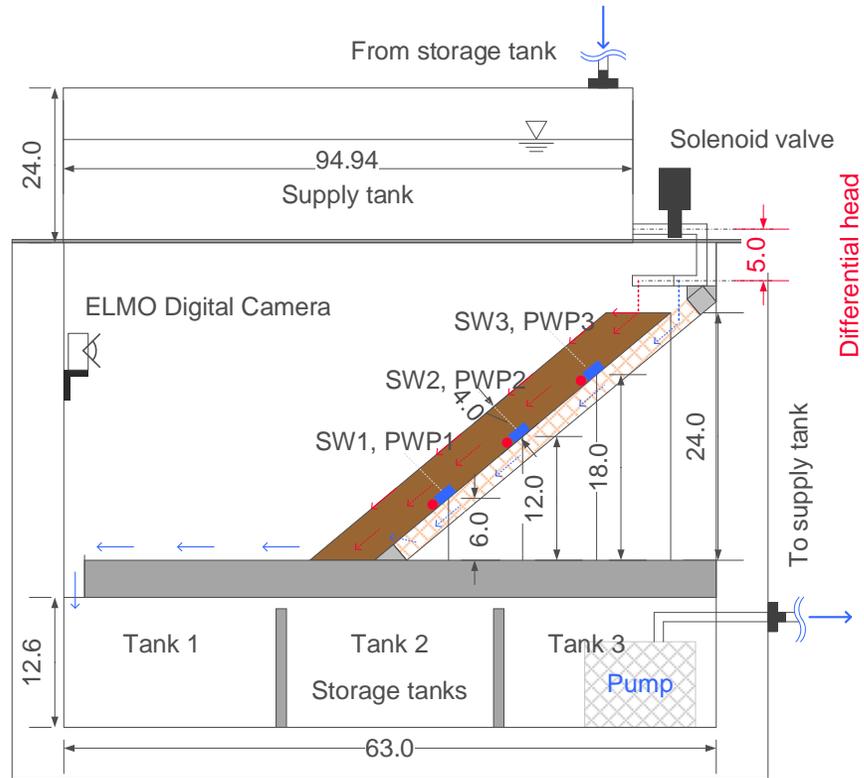
遠心場における散水実験において、崩壊の推移を画像解析で分析



- 崩壊の推移と画像解析から得られる相関係数および累積偏差ひずみの関係を確認すると、小規模な土砂流出の発生直前に関しては、50 G 載荷時点における初期状態を基準として求まる相関係数の低下として現れる

フォトグラメトリーにおける撮影環境

iPhone 12 Pro × Metashape (AGISOFT社製)



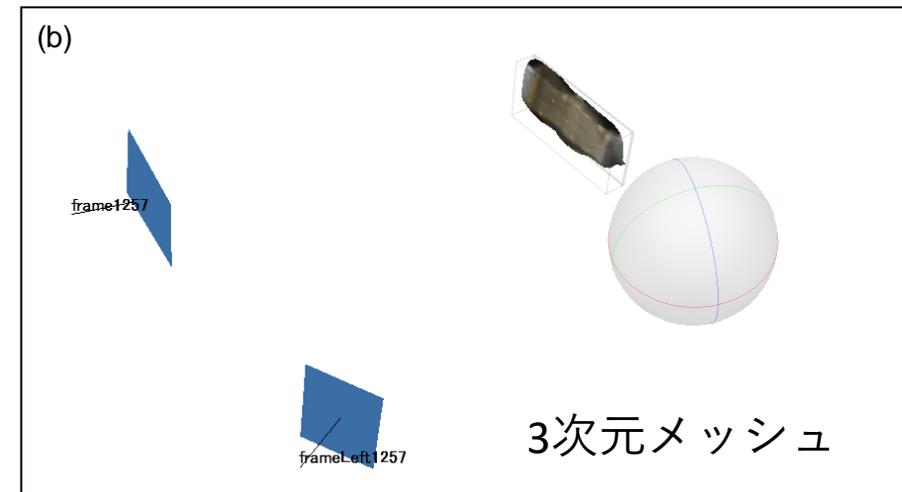
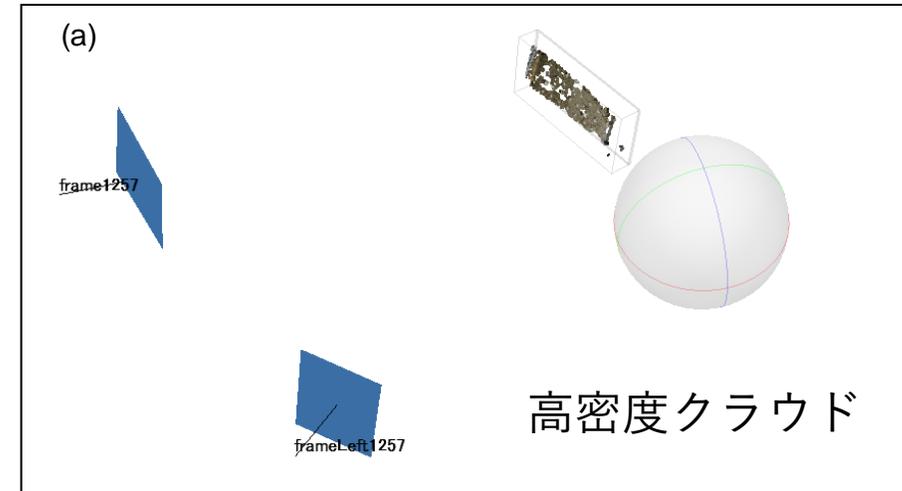
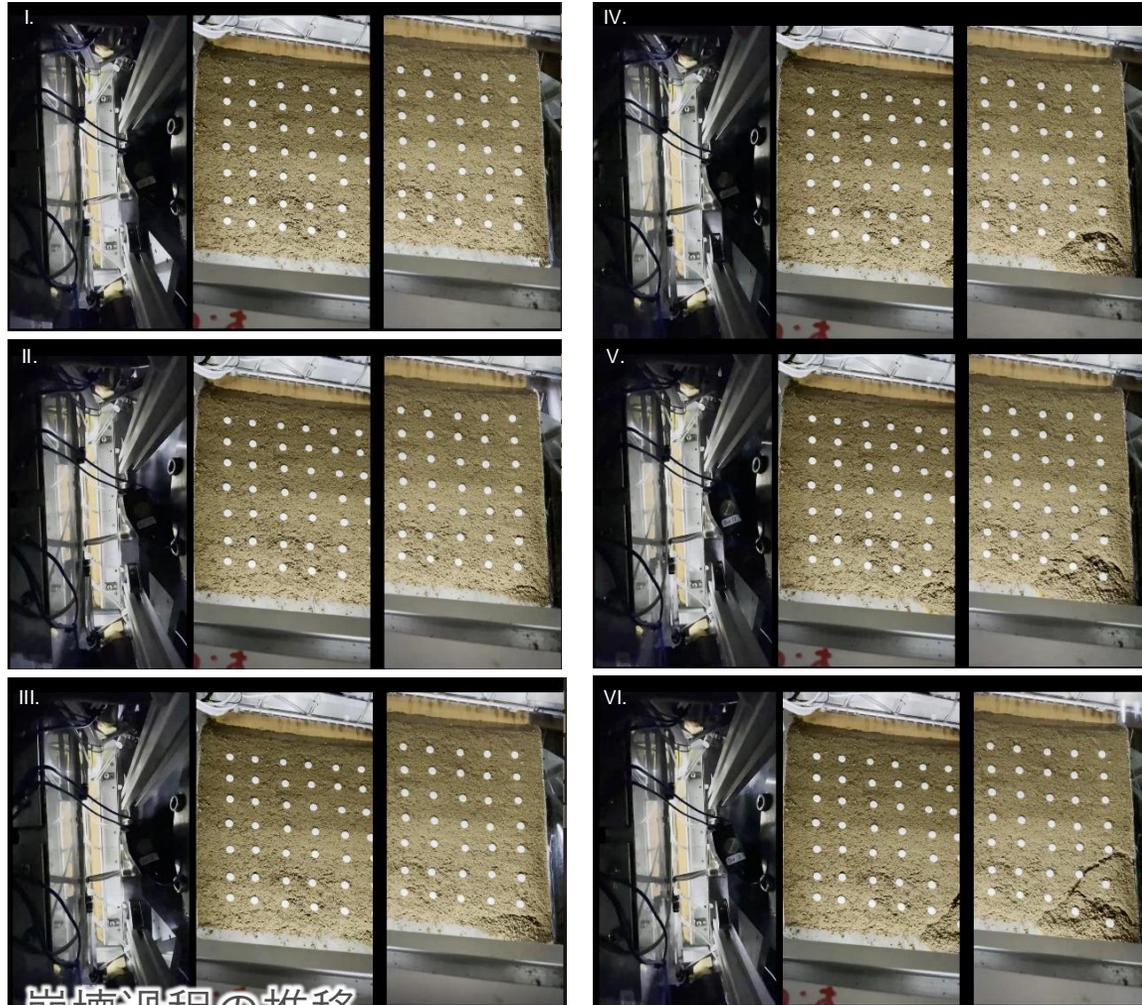
表層流 × 基盤内の浸透流を模擬した実験機構



模型の撮影状況：フォトグラメトリーによる検討

フォトグラメトリーによる検証結果

土槽内の寸法制約 vs フォトグラメトリーにおける計測原理 vs 動的現象

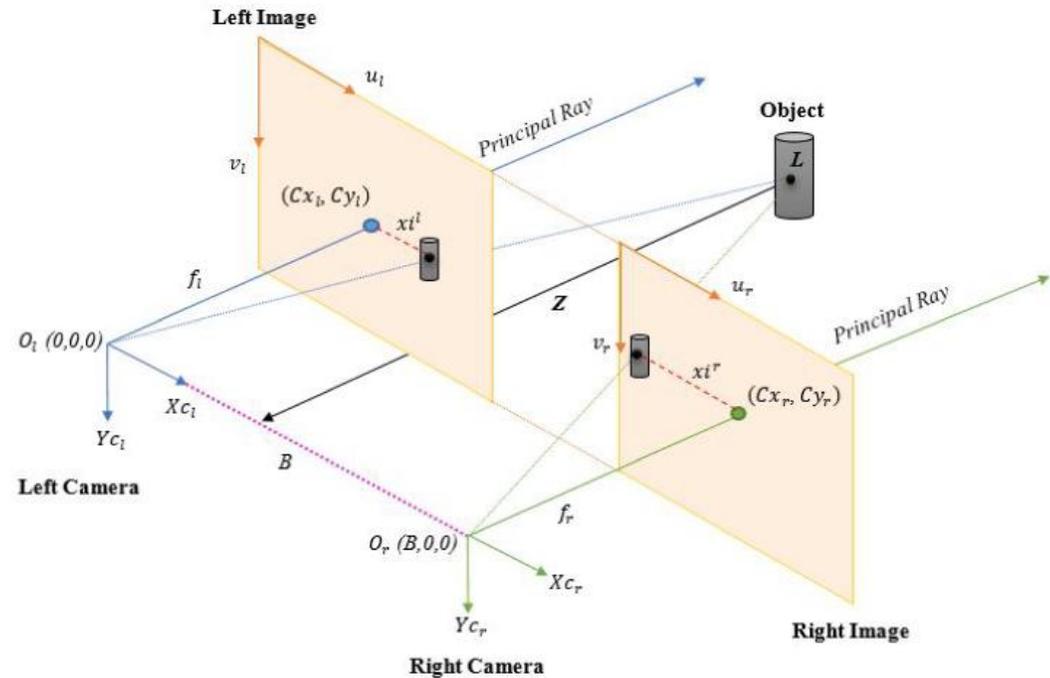
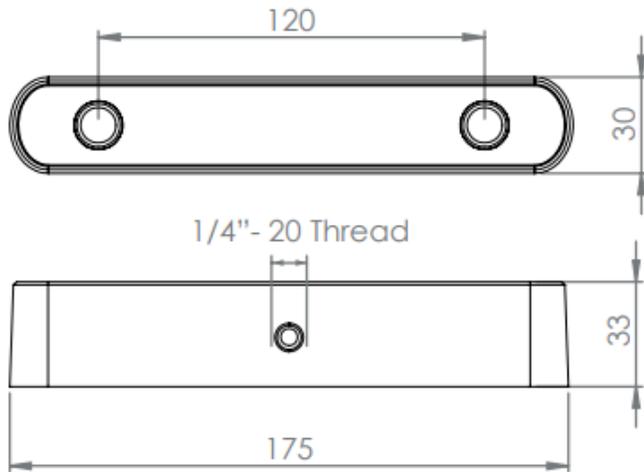


デプスカメラの特徴

ステレオカメラから得られる画像情報とカメラ間の距離に基づき奥行方向の距離を計測

Mechanical Drawing

Dimensions are in mm



デプスカメラの寸法

デプスカメラの計測原理 (Ortiz et al, 2019)

ZED, 2019.: detailed specifications, <https://cdn.stereolabs.com/assets/datasheets/zed-camera-datasheet.pdf>

Ortiz et al, 2018.: Depth Data Error Modeling of the ZED 3D Vision Sensor from Stereolabs, Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis

デプスカメラの特徴

デプスカメラ（stereolabs 社製）の仕様

Video Output

Output Resolution	Side by Side 2x (2208x1242) @15fps 2x (1920x1080) @30fps 2x (1280x720) @60fps 2x (672x376) @100fps
Output Format	YUV 4:2:2
Field of View	Max. 90° (H) x 60° (V) x 100° (D)
RGB Sensor Type	1/3" 4MP CMOS
Active Array Size	2688x1520 pixels per sensor (4MP)
Focal Length	2.8mm (0.11") - f/2.0
Shutter	Electronic synchronized rolling shutter
Interface	USB 3.0 - Integrated 1.5m cable

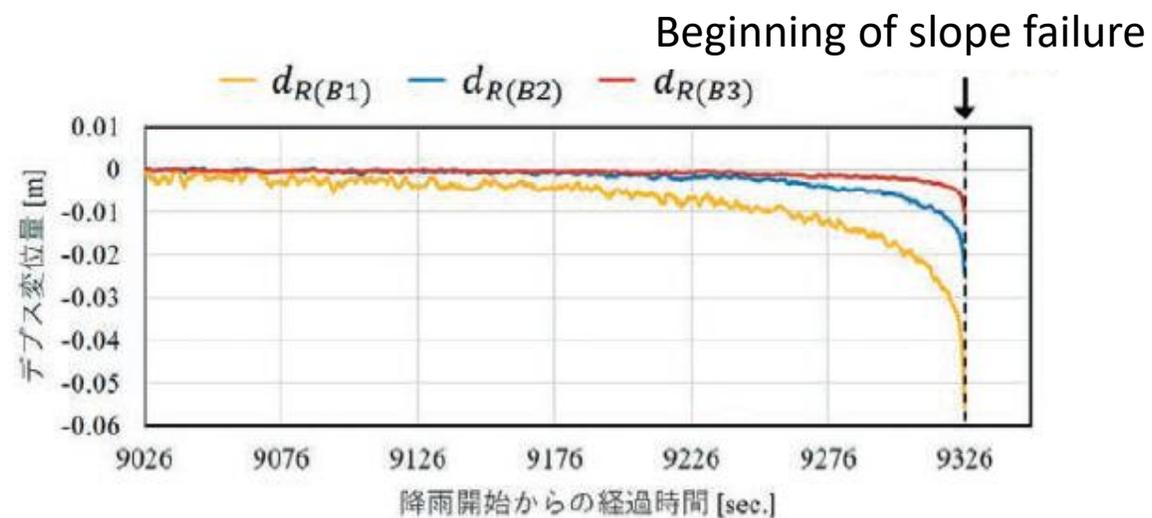
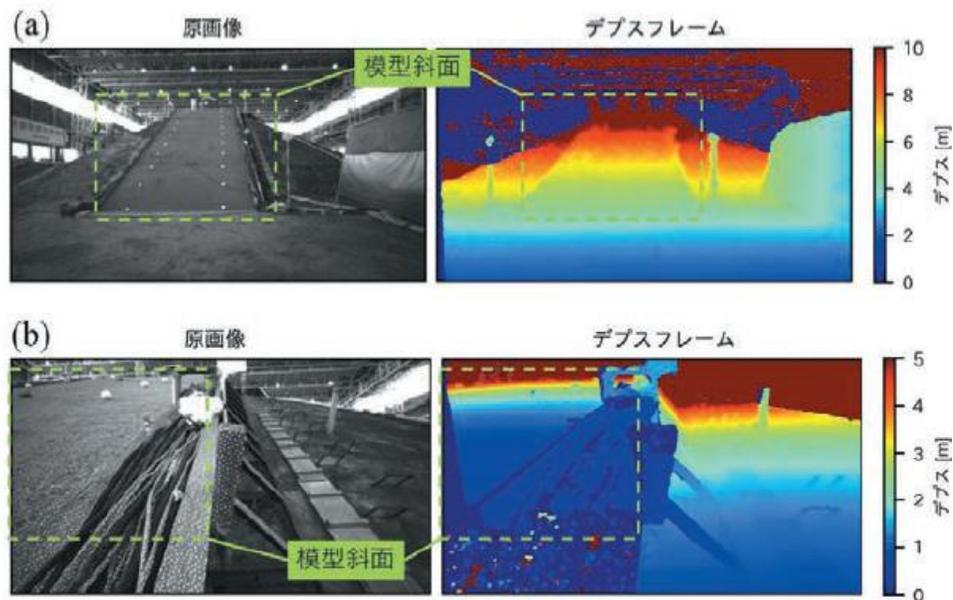
Depth Sensing

Baseline	120 mm (4.7")
Depth Range	0.5 m to 25 m (1.6 to 82 ft)
Depth Map Resolution	Native video resolution (in Ultra mode)
Depth Accuracy	< 2% up to 3m < 4% up to 15m

ZED, 2019.: detailed specifications, <https://cdn.stereolabs.com/assets/datasheets/zed-camera-datasheet.pdf>

尾上ら（2020）による適用事例

奥行方向の変位の計測精度の向上とより広範な撮影レンジへの改善が必要



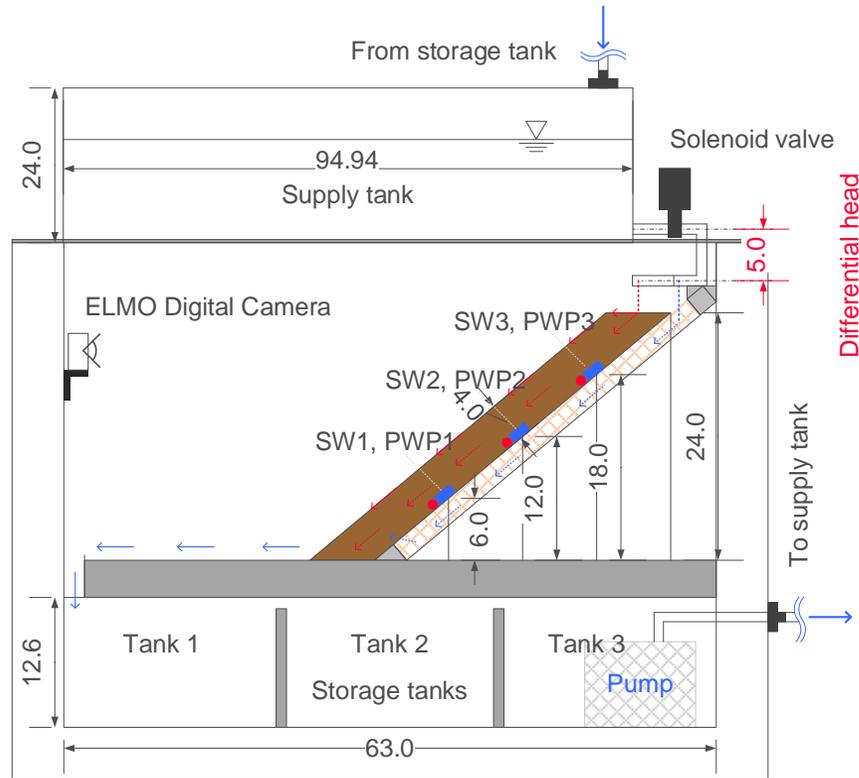
原画像（左）とデプスフレーム（右）
Intel社製 Realsense モデル

デプス変位量に関する時系列データ

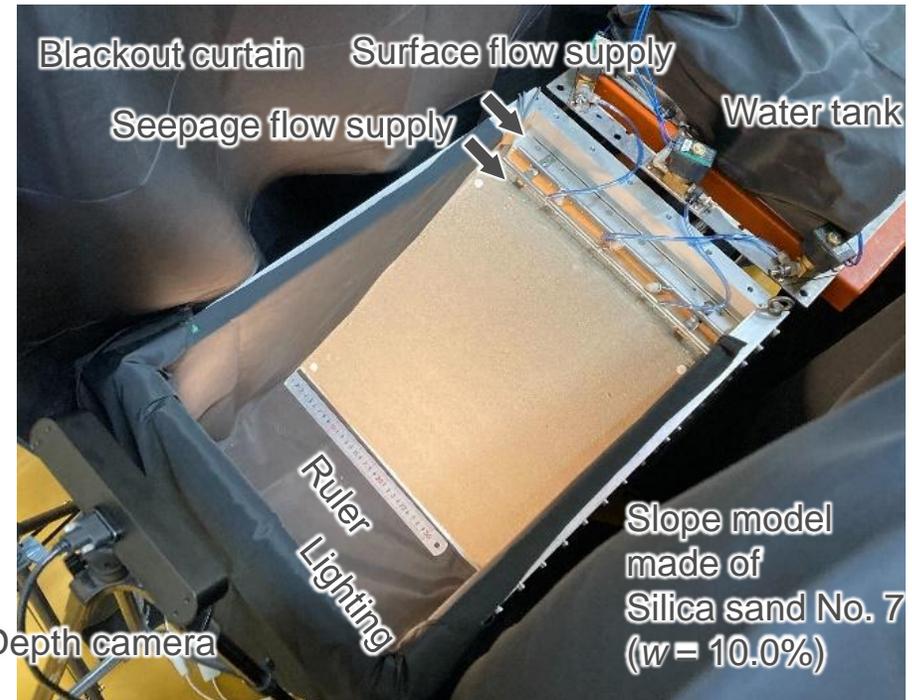
尾上ら（2020）：デプスカメラを用いた斜面崩壊時の変位計測に関する研究－土砂災害時の救助活動における安全監視への適用性－，防災科学技術研究所 研究報告，doi/10.24732/NIED.00002410.

デプスカメラを導入した撮影環境

撮影精度は取得される画像の輝度等に左右されるため1G場で検証



表層流 × 基盤内の浸透流を模擬した実験機構



デプスカメラにおける撮影環境
1G場における崩壊を再現するため、珪砂7号を採用

斜面模型の崩壊過程

斜面崩壊の推移；基盤内の浸透流により斜面下部が飽和して崩壊

Left camera

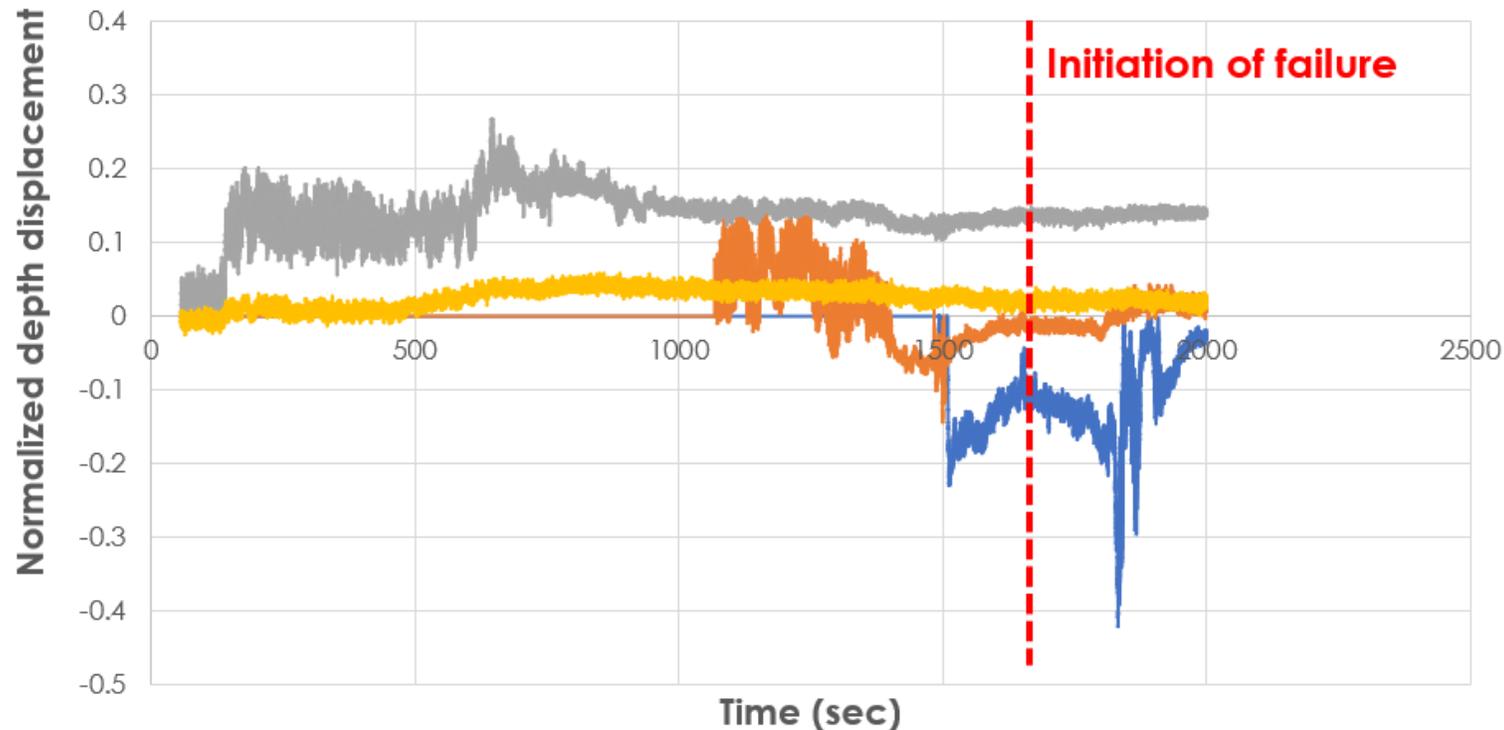
Right camera



デプスカメラによる撮影画像の解析結果

Location 1 ~ 4における撮影方向の変位量に関する
時系列データ；ノイズが大きく計測結果と現象の考察が難しい

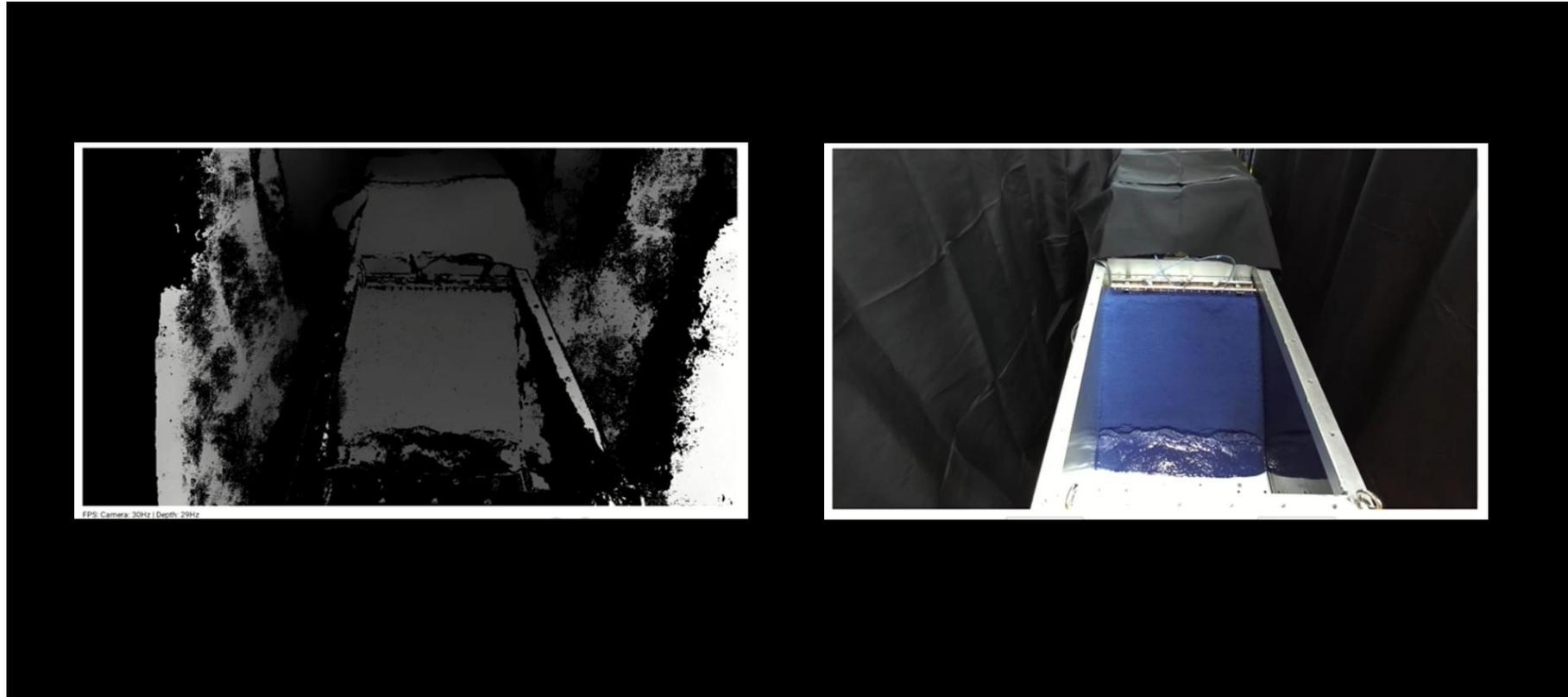
基準化した撮影方向の変位量に関する時系列データ



- Location 1
- Location 2
- Location 3
- Location 4

画像解析の改善

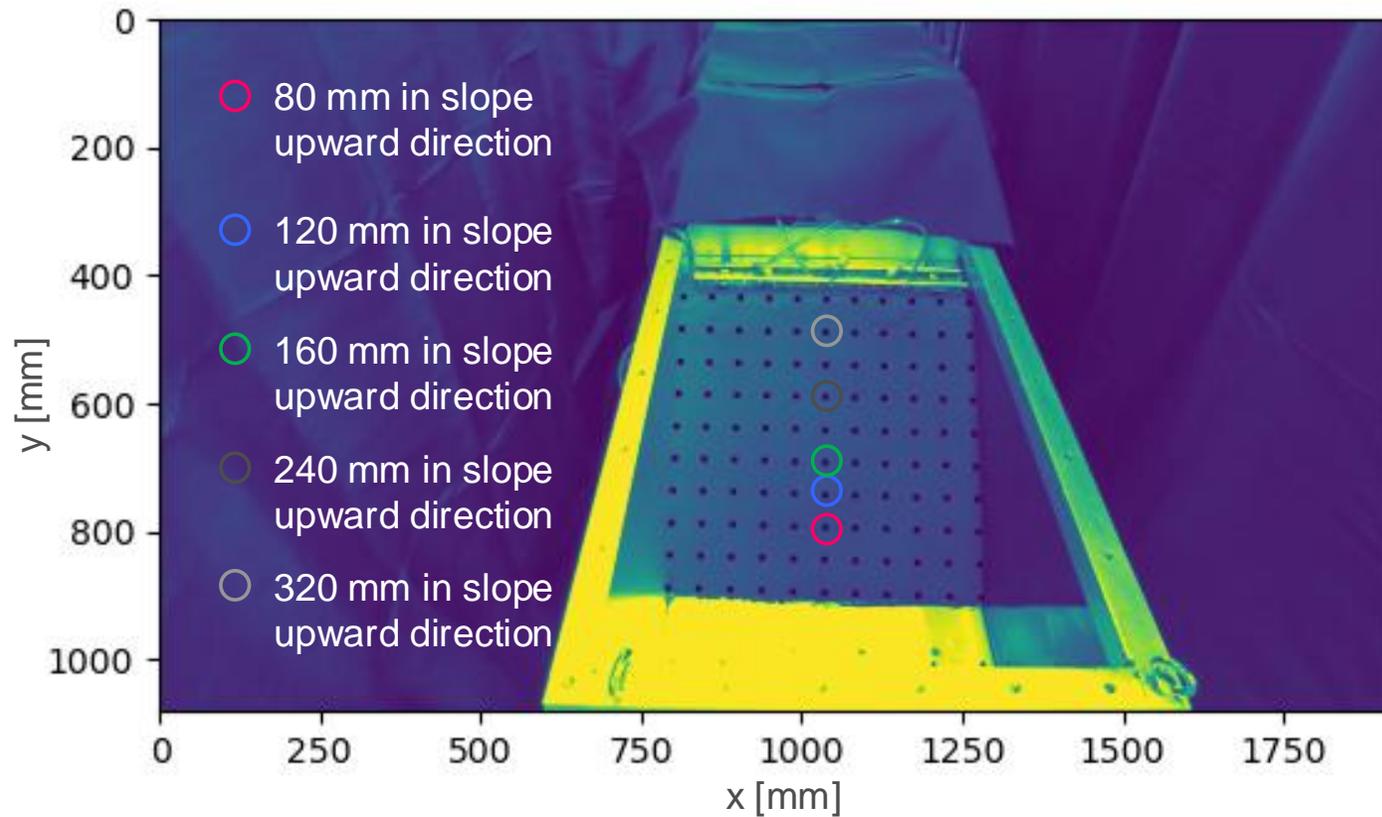
珪砂7号を色砂へ変更：デプスカメラの撮影精度は輝度に依存するため、土槽との明暗に差をつける



- 色砂へ変更することでデプスマッピングの明暗の差が明瞭になった（画像左）
- 斜面の崩壊過程；基盤内の浸透流により，斜面下部が飽和して浸食され，脆性的に破壊が進行

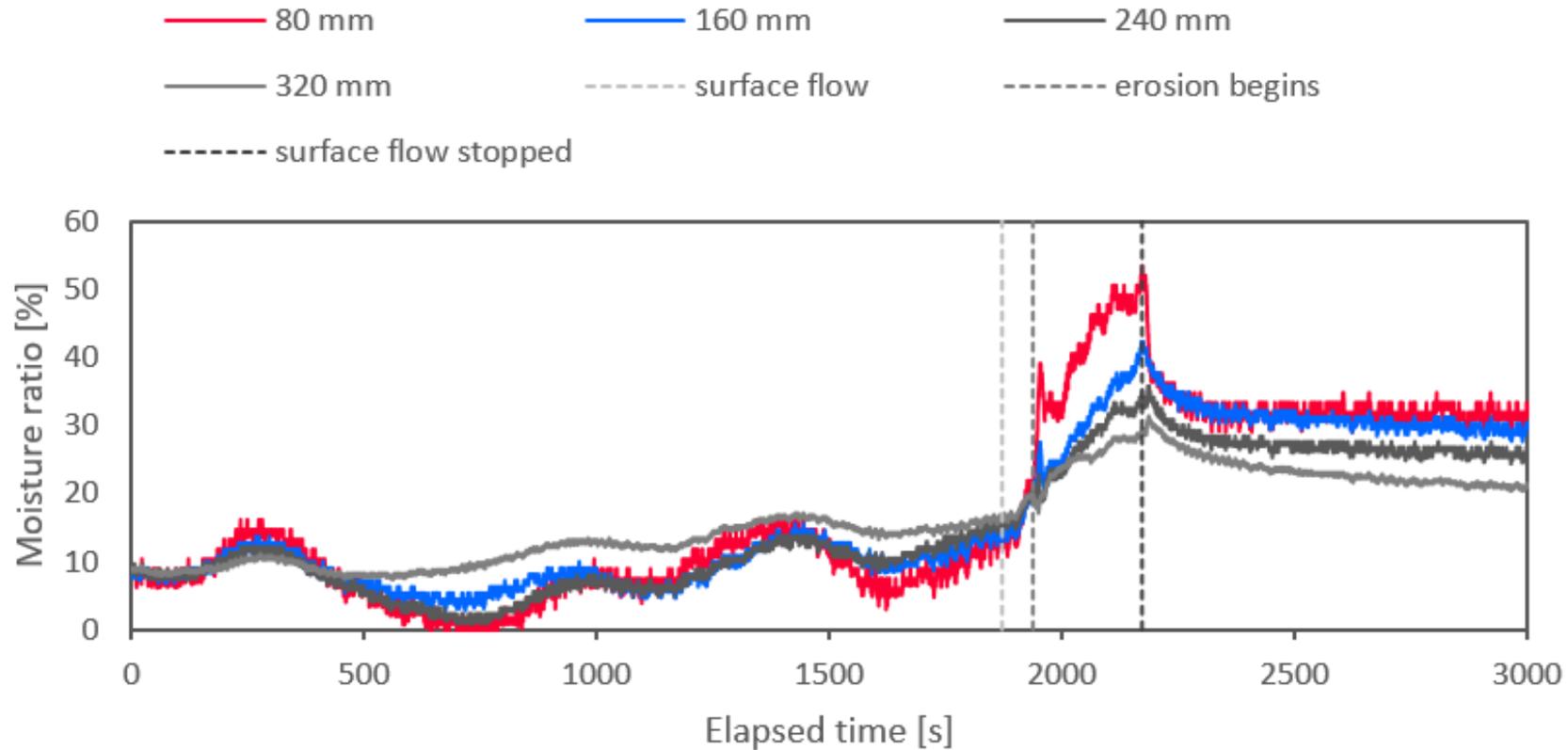
画像解析の改善

法面と平行な向きに下部から80 mm刻みで，土壤水分計を設置



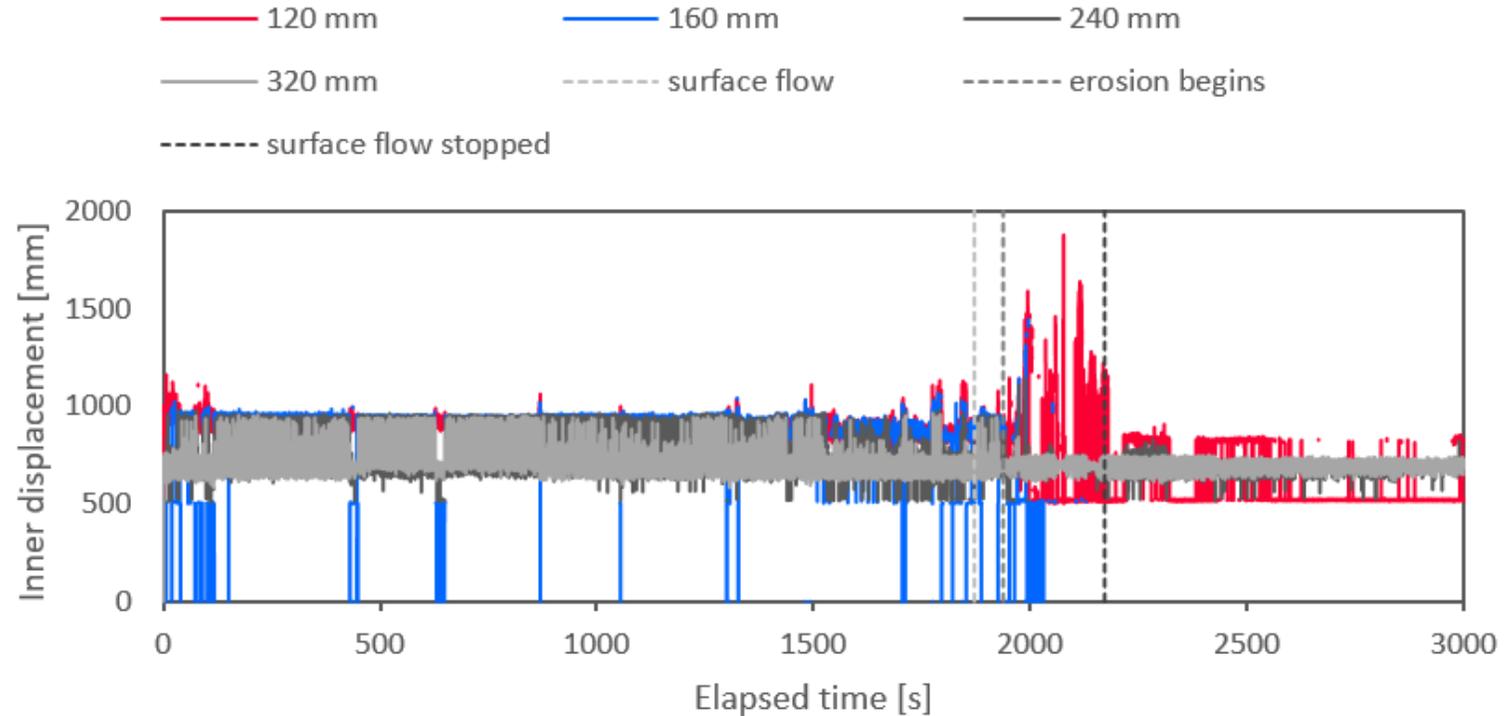
- 解析領域は斜面表層部を対象とし，メッシュ間隔は40 mmとした
- フレームレートは60 fps のため，サンプリング間隔は 1/60 sである

土壌水分計の時系列データ



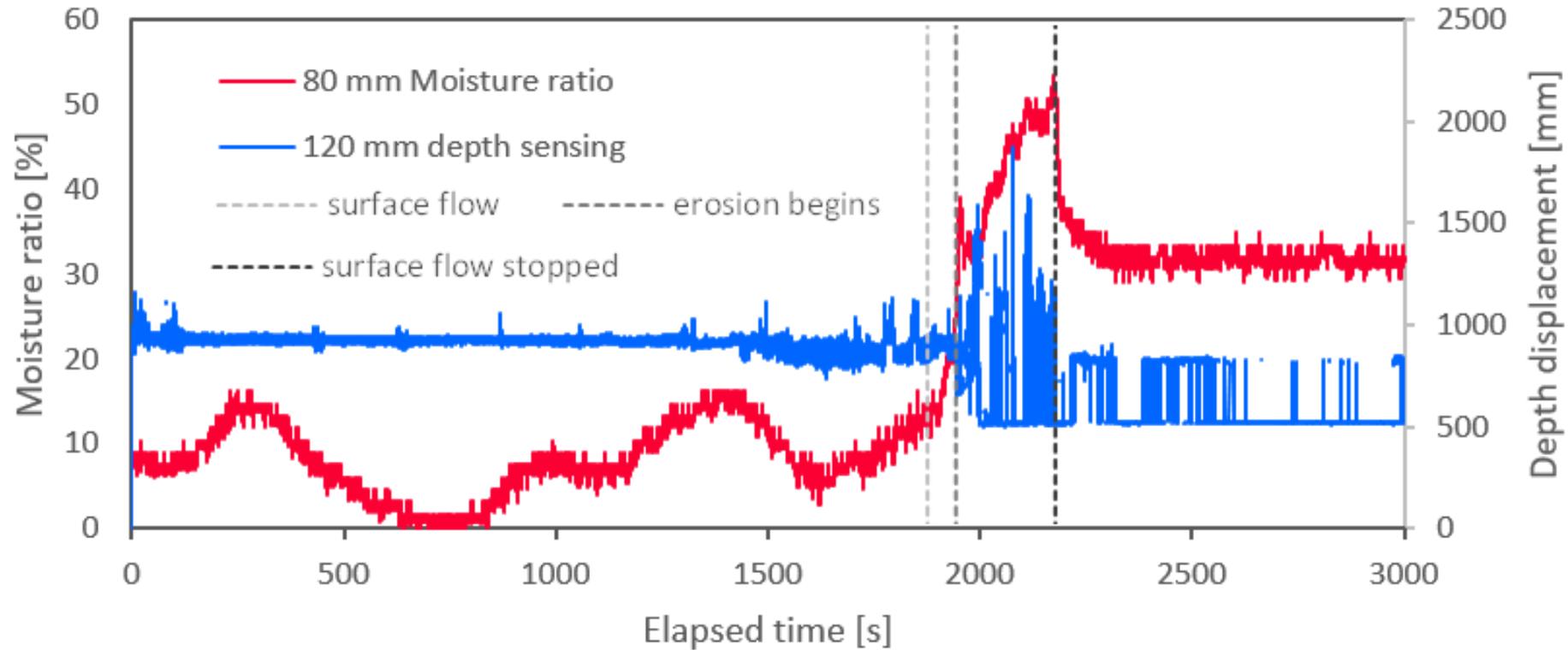
- 表層流の開始, 浸食の開始, 表層流の終了など, 水の応答に対して敏感に応答

デプスカメラにおける撮影方向の変位時系列データ



- 撮影方向の変位時系列データの多くはノイズが多いか、解析できていない点が多い
- デプスカメラの計測精度を向上するために、撮影環境のさらなる改善が必要
 - (デプスマッピングを確認すると、珪砂が飽和する過程で飽和珪砂が照明を反射する状態が確認され、珪砂を用いたことが弊害としてあった可能性がある)

デプスカメラにおける撮影方向の変位時系列データと土壌水分計の応答



- デプスカメラの解析結果は、土壌水分計の応答にやや遅れるものの、浸食の開始と良い相関を示す
- 奥行方向の変位が精度よく解析されると、斜面内の水分量と、結果として生じる斜面奥行方向における変位の応答関係を分析可能であることが示唆；尾上ら（2020）の検討と同様

変位量データをどのように扱うか？

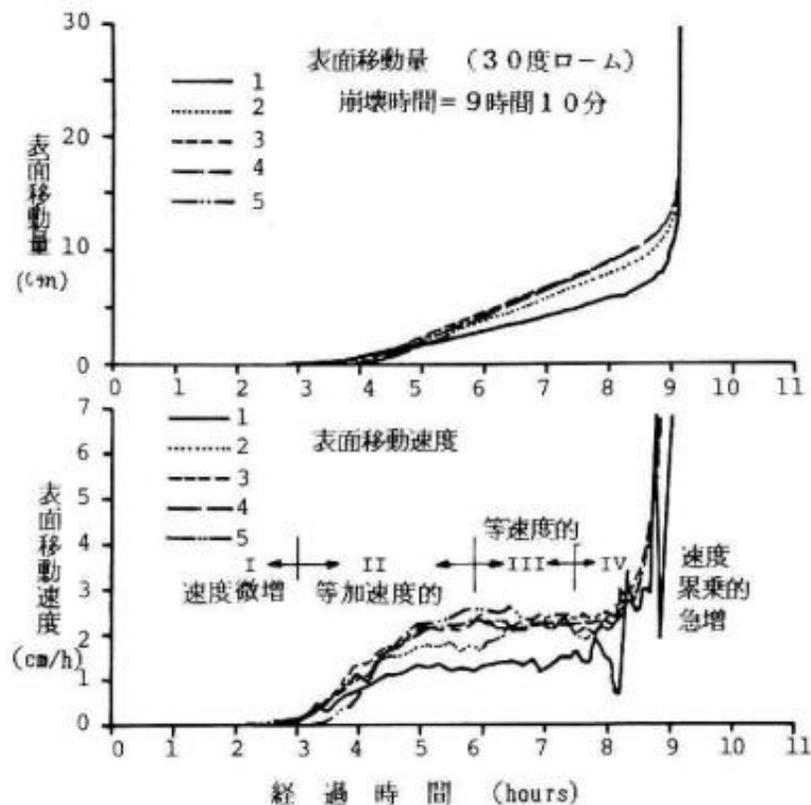


図1 模型斜面の崩壊実験で測定された表面移動量と移動速度の変化(福園, 1982).
 Fig. 1 Variations of surface displacement and velocity of surface displacement measured in a model slope failure (Fukuzono, 1982).

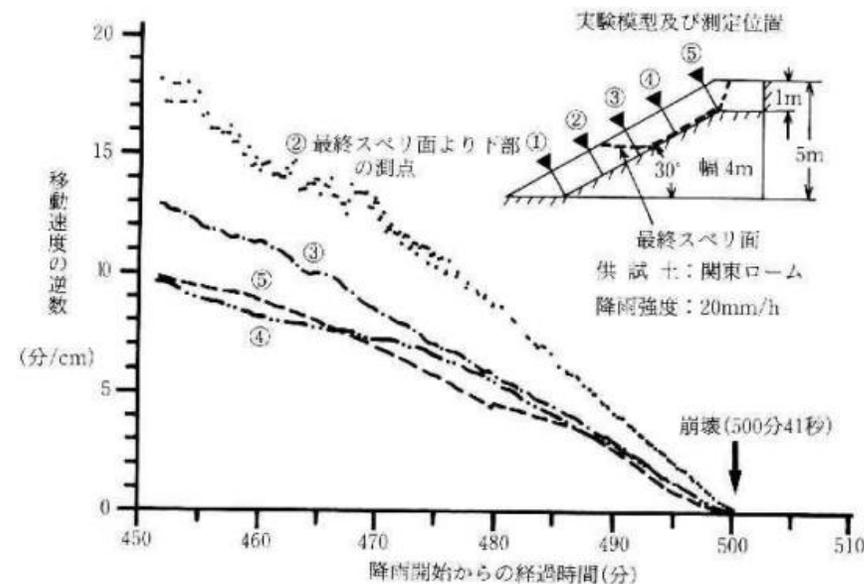


図17 関東ローム斜面の異なる4測点で観測された平均速度の逆数の比較.
 Fig. 17 Comparison of curves of reciprocal of mean velocity measured at four measuring points in a loamy soil model slope failure.

福'園輝旗* : 平均速度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予測—斜面崩壊の発生予測に関する研究 (3) —, 防災科学技術研究所

https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_report/PDF/46/46fukuzono.pdf

ハイパースペクトルカメラ・ビデオスペクトルカメラを 活用した地盤内水分挙動の推定

以降に示す本講演会の資料は、主として一般社団法人京都知恵産業創造の森 一般社団法人京都知恵産業創造の森 産学公連携共同研究開発事業補助金による研究成果である。ここに記して謝意を示す。

水に起因する斜面の崩壊現象

表層流・浸透流を組み合わせた斜面崩壊実験

- 水に起因する斜面崩壊のメカニズム
 - 表層土の飽和化
 - 粘着力の低下（せん断抵抗力の低下）
 - 土塊重量の増加
 - 斜面内のせん断応力の増加
 - 表層土の浸食
 - 内部浸食の進行，細粒分の流出に伴う斜面内部構造の不安定化
 - 二重地下水の影響
 - 表層部の飽和化
 - 岩盤層における地下水の存在，揚圧力の発生



素因 × 誘因 = 自然現象

地形・地質・土質・岩質・水文環境・植生

目に見えない土中の水の流れを可視化する

→ 雨が降ったら誰でも上記の関係式が見えれば（可視性）、
避難（災害の低減）や、事前対策（復旧力の向上）の意思決定に
役立てられるのでは？

「令和2年7月8日の早朝、枚方亀岡線において、道路の山側法面の土砂・倒木が崩落し、延長約50メートルにわたって2車線を塞ぐとともに、道路を越えて谷側の民有地にも到達。」

（引用元；大阪府：<http://www.pref.osaka.lg.jp/ibarakidoboku/xyz/index.html>）

土の水の流れを可視化する

従来の土中水分計測における評価空間とリアルタイム性はトレードオフ

- 従来はリアルタイム性と計測範囲がトレードオフの関係
 - 土壤水分計による点の評価（秒スケール）
 - 誘電率を計測（例：TDR方式）
 - 衛星解析による面の評価（日、週、月スケール）
 - マイクロ波、重力・地盤変動を利用
 - ただし...
- 空間的な水分移動はシミュレーションにより補完
 - 不飽和土の水分移動現象

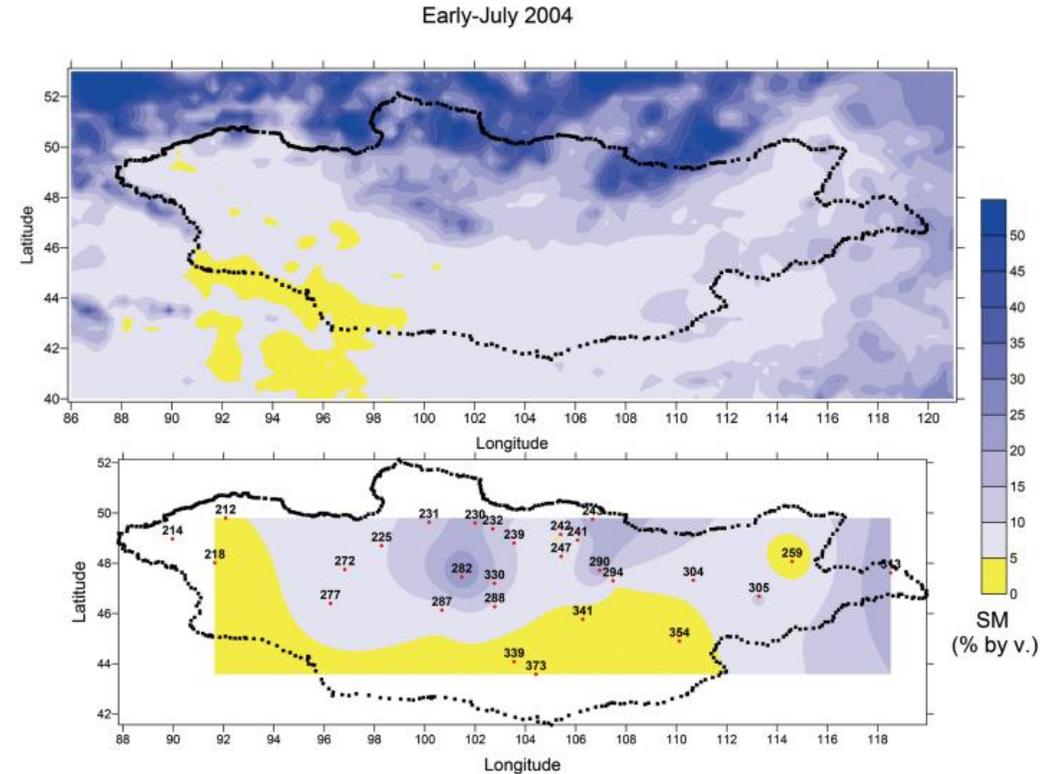
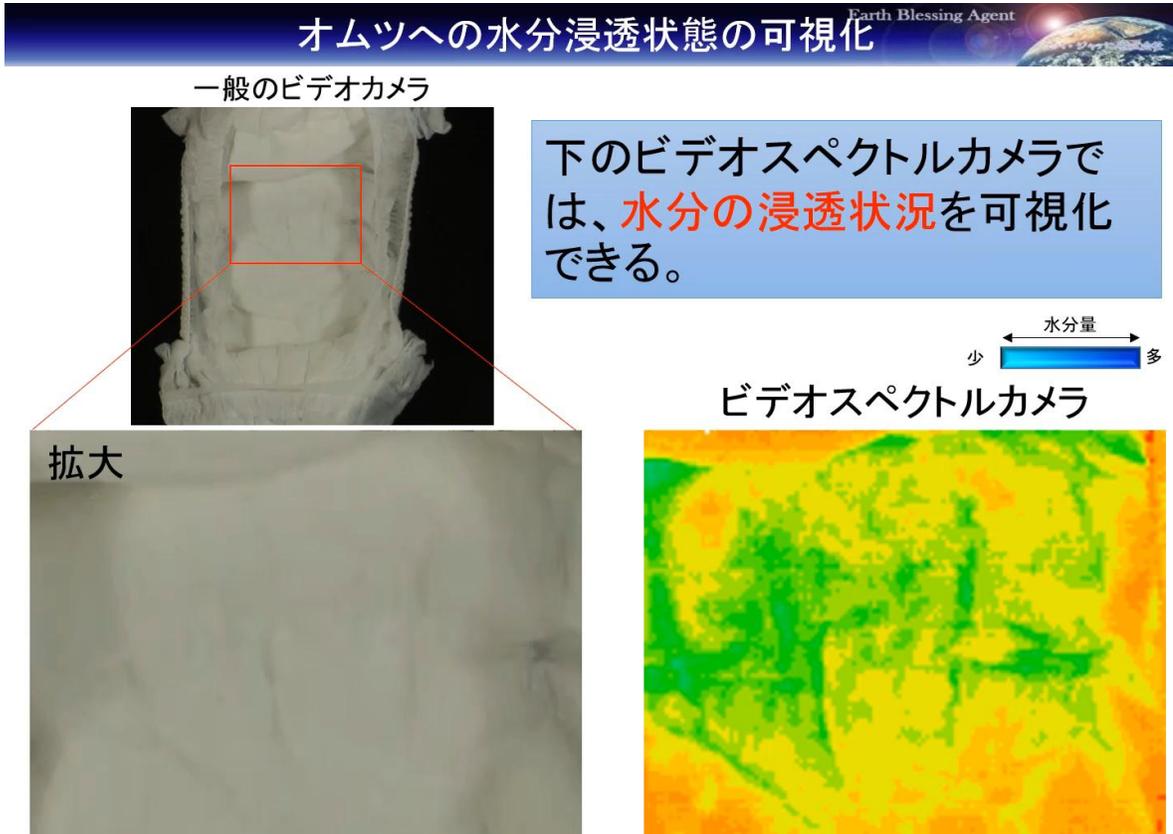


図2 2004年7月上旬(10日間平均)のAMSR-E土壤水分分布(上図)とモンゴル国旧自然環境省自然環境モニタリングネットワーク(NAMHEM)の土壤水分分布(下図、0-5cm深度、朱点は観測点、番号は観測点コード)の比較(SM:土壤水分量)

*開発一郎：陸域水循環における土壤水分観測研究，地下水学会誌，Vol. 60, No. 3, pp.263-271, 2018.

土の水の流れを可視化する

リアルタイム性を失わずに，面的・立体的な土中水分を評価可能か？



Copyright (C) EBA JAPAN All Rights Reserved.

- リアルタイム性の面・立体による評価
 - ハイパースペクトルカメラの計測機構
 - 鮮明な波長分布（スペクトル）を取得
 - 焦点をおく波長を限定することで、波長の変化を見たい物理現象に置換
- スペクトルビデオによる空間評価
 - 空間の波長変化速度が解明すれば
 - 三次元的な波長変化速度
≡ 空間的な土中の水分移動現象
 - デジタルツインの浸透現象モデル
 - リアルタイム性を有する空間的な土中水分の評価技術を確立

* エバジャパン株式会社より提供

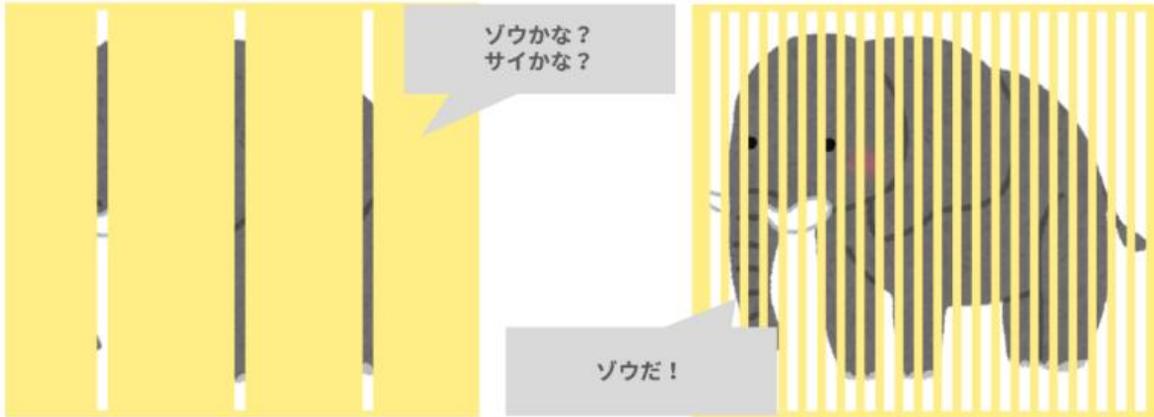
土の水の流れを可視化する

取得するスペクトルの解像度が高いことで、物体の識別能力を増強

ハイパースペクトルセンサの強み：物体の識別能力が高い 

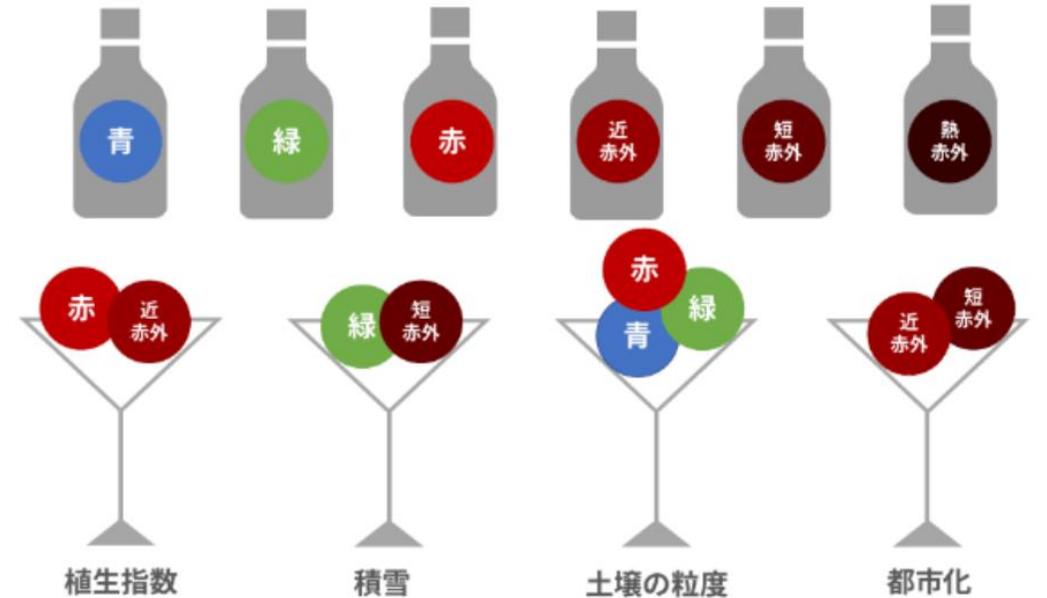
マルチスペクトルセンサでの
観測イメージ

ハイパースペクトルセンサでの
観測イメージ



ハイパースペクトルセンサは
穴（観測している波長）の数が多く、隣合っている穴が近いため、
何を撮影しているかが分かりやすい！

波長の組み合わせで見えるものが違う？ 



土中の水分動態可視化に適用可能か？

宙畑：ハイパースペクトルセンサとは～仕組み、用途、代表的なセンサ～日本の技術力が集結したHISUIの凄さに迫る！、光学、SARに次ぐ第三のセンサ？世界でも注目のハイパースペクトルセンサについてご紹介します！、 <https://sorabatake.jp/28639/>

土の水の流れを可視化する

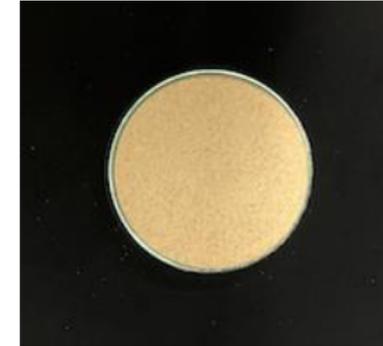
評価内容

ハイパースペクトルカメラを用いて、土壌(砂)サンプルの含水量評価を行った。

計測方法

ハイパースペクトルカメラをカメラスタンドに接続し、ガラスシャーレに入れたサンプルに対して直上から計測。サンプルは絶乾状態を初期状態とし、スポイトを用いてサンプル中央部に水を滴下していき、飽和するまで加水した。光源にはハロゲン灯を用い、対象からの反射スペクトルを取得した。

サンプル初期状態



計測機種



スペクトルイメージングシステム SIS-I

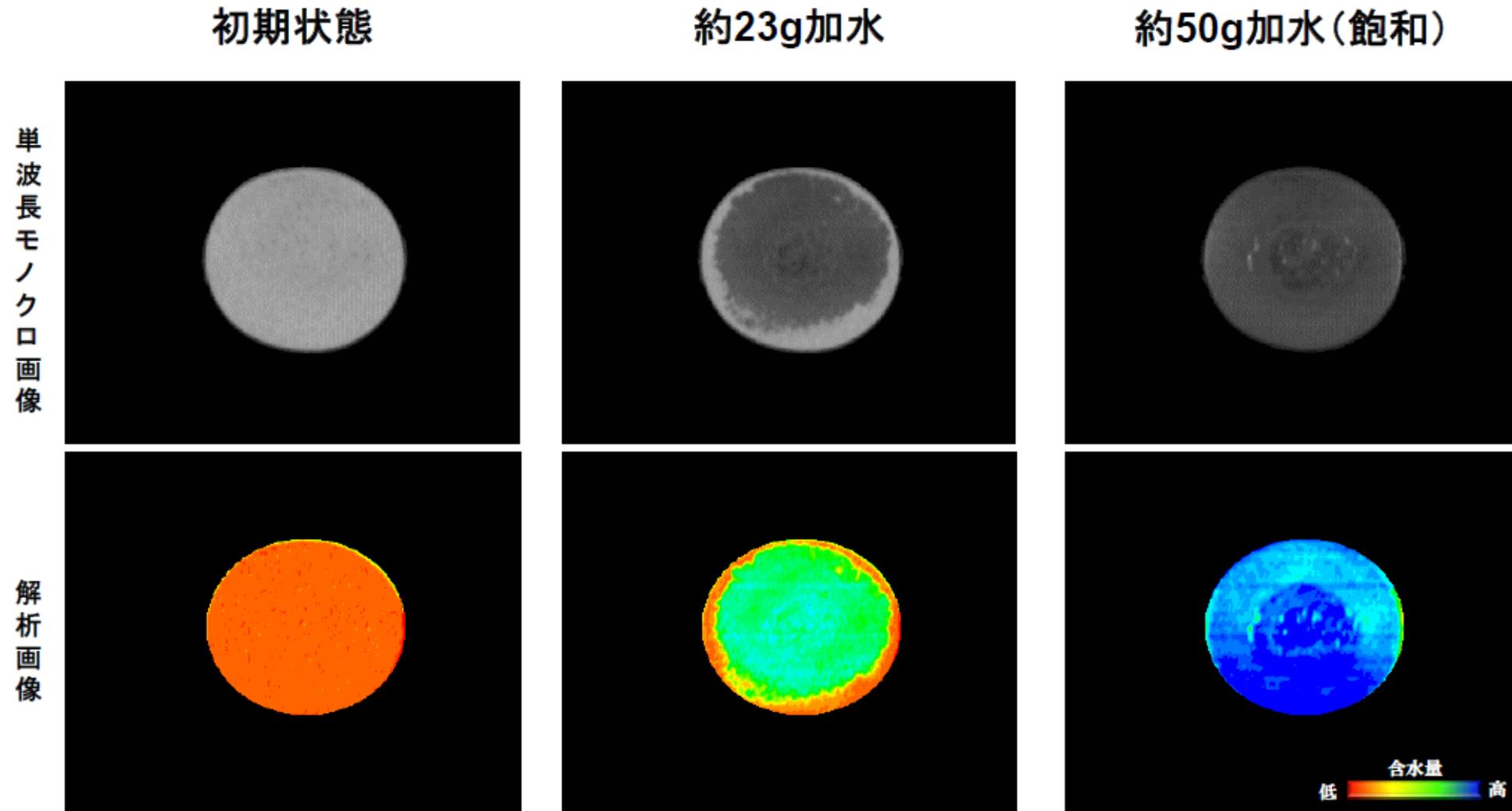
【測定波長域】：900nm～1700nm

【波長分解能】：10nm

【画像解像度】：12.8万画素（400×320pixel）

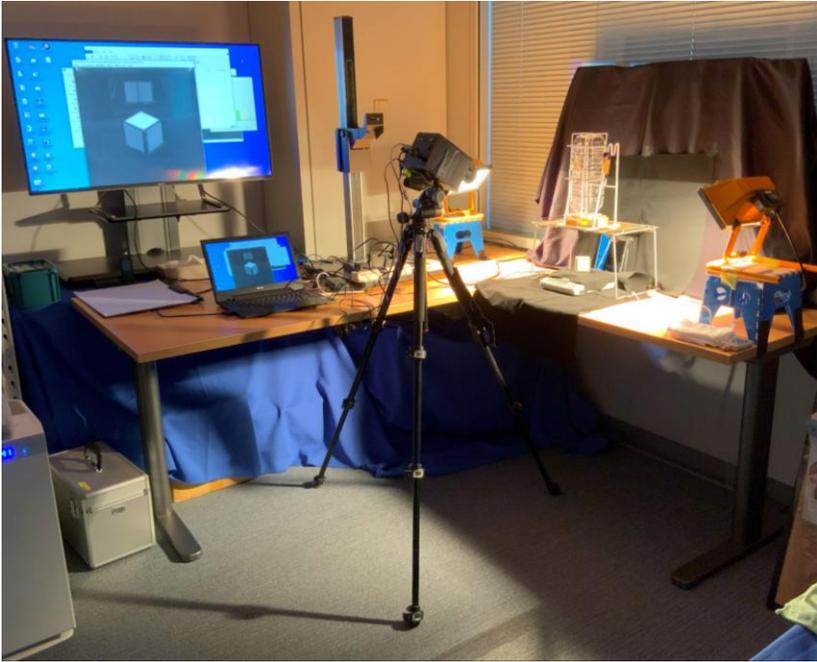
土の水の流れを可視化する

土の含水状態をイメージングすることが可能：変化速度の空間分布 > 表層浸透現象の捕捉



土の水の流れを可視化する

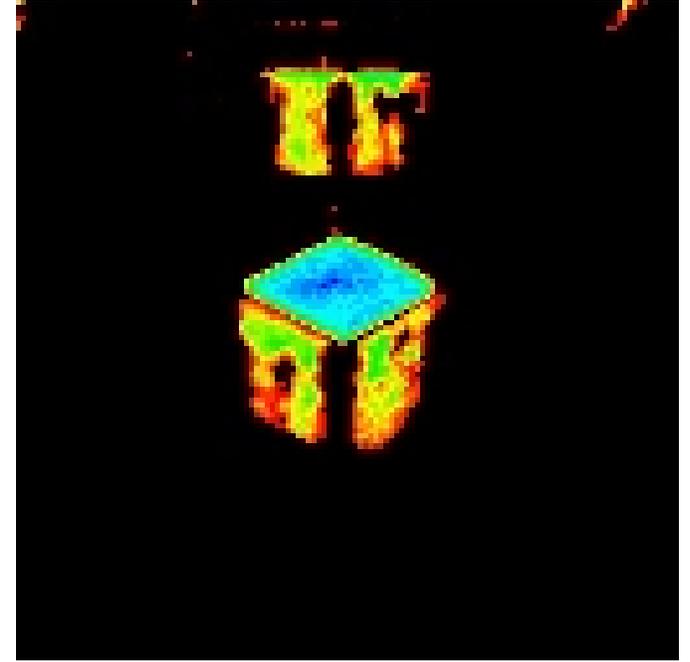
計測波長領域を限定し，反射スペクトル強度の時系列変化を空間的に可視化



撮影環境



実験状況

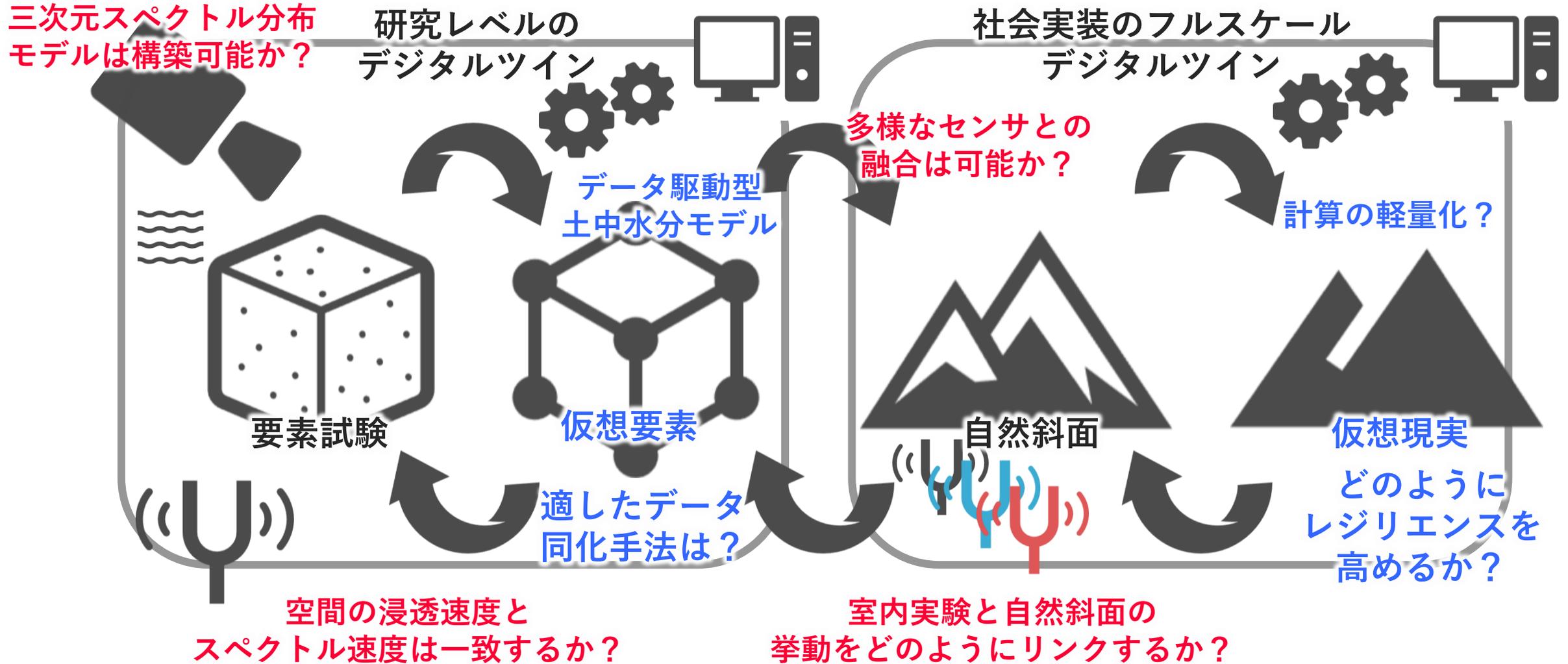


解析結果

- 土の浸透状況について，リアルタイム性の面（立体）による計測が可能
- 面（多面）の浸透情報をシミュレーションと融合する
 - 土中の水の流れの可視化へ

土中の水の流れを可視化する（将来構想）

デジタルツインを通じて、三次元的な土中水分状況を仮想空間でモニターする



参考文献

- 木村 嘉富：最近の道路災害の特徴と災害覚知技術の開発，平成30年度国土技術政策総合研究所講演会，2018-125. (2021/03/10 アクセス <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1055pdf/ks105515.pdf>)
- 国土交通省：平成30年7月豪雨における被害等の概要，2018-9. (2021/03/10 アクセス https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunka-kai/shouuinkai/daikibokouikigouu/1/pdf/daikibokouikigouu_01_s2.pdf)
- 千木良雅弘：災害地質学ノート，近未来社，2018.
- 千木良 雅弘：近年の地質災害から学んだこと，京都大学防災研究所年報A，2020-12. (<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/260720>)
- Chigira, M. Micro-sheeting of granite and its relationship with landsliding specifically after the heavy rainstorm in June 199, Horishima Prefecture, Japan. Engineering Geology, 59, pp. 117-128, 2001.
- Orense et al.: Instrumented model slope failure due to water seepage, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 26, No. 1, pp. 15-26, 2004.
- Orense, R., S. Shimoma, K. Maeda, K. Farooq and I. Towhata.: Laboratory model tests on rainfall-induced landslides, Proceedings, International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Kyoto, Japan, 61-71, 2002.
- Bhattacharjee, D., and Viswanadha, B.V.S.: Development of a rainfall simulator in centrifuge using Modified Mariotte's principle, Proceedings of Physical Modeling in Geotechnics, pp. 337 – 342, 2018.
- Khan, I. U., Al-Fengani, M., and Black, J.A.: Development of a rainfall simulator for climate modeling, Proceedings of Physical Modeling in Geotechnics, pp. 507 – 512, 2018.
- 株式会社オーク：Agis soft Metashape, <https://oakcorp.net/agisoft/> (2022/04/28 アクセス)
- Ortiz, L., Cabrera, V., and Goncalves, L.: Depth Data Error Modeling of the ZED 3D Vision Sensor from Stereolabs, electronic letters on computer vision and image analysis, Vol. 17, No. 1, 2018.
- 尾上 修浩，石澤 友浩，檀上 徹，福園 輝旗：デプスカメラを用いた斜面崩壊時の変位計測に関する研究－土砂災害時の救助活動における安全監視への適用性－，防災科学技術研究所 研究報告，Vol. 85, pp. 25-38, 2020. doi/10.24732/NIED.00002410
- Stereolabs:ZED, ZED Camera and SDK Overview, 2019. <https://cdn.stereolabs.com/assets/datasheets/zed-camera-datasheet.pdf> (2022/04/28 アクセス)

Thank you for your kind attention
